

การศึกษาการสกัดในระบบของเหลว-ของเหลวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

STUDY OF LIQUID-LIQUID EXTRACTION USING SPINING DISC  
REACTOR

จตุพล เย็นฉ่ำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การศึกษาการสกัดในระบบของเหลว-ของเหลวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบจาน

หมუნ

จตุพล เย็นฉ่ำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


ปีการศึกษา 2564


ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาการสกัดในระบบของเหลว-ของเหลวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน  
Study of Liquid-Liquid Extraction Using Spinning Disc Reactor  
ชื่อ - นามสกุล      นายจตุพล เย็นฉ่ำ  
สาขาวิชา      วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรินทร์ดา อับมานะ, วศ.ด.  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      รองศาสตราจารย์สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, Ph.D.  
ปีการศึกษา      2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยภพ ศีระวรกุล, วศ.ด.)


  
..... กรรมการ  
(อาจารย์วัชรพงษ์ ขาวดี, วศ.ด.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิธรดี จันทลี, วศ.ด.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรินทร์ดา อับมานะ, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)  
วันที่ 18 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการสกัดในระบบของเหลว-ของเหลวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน
ชื่อ-นามสกุล	นายจตุพล เย็นฉ่ำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรินทร์ดา อับมานะ, วศ.ด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2564

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการสกัดกรดเบนโซอิก ออกจากเฮปแทน ด้วยน้ำ ซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่ละลายเข้าหากัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน (spinning disc reactor; SDR) การศึกษาในครั้งนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การทดลองการสกัด และการจำลองรูปแบบการผสมของน้ำ และเฮปแทนในเครื่อง SDR ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อช่วยอธิบายประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในเครื่อง SDR

โดยประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลภายในเครื่อง SDR จะนำเสนอด้วยค่าความสูงของชั้นฟิล์ม พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส รูปแบบการไหลของเฮปแทน เวลาคงอยู่ และโปรไฟล์ความเร็ว ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราการไหลรวม (Q) ความเร็วการหมุน (R) และพื้นที่ผิวของจานหมุน สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราการไหลรวม 5 ถึง 15 ml/s ความเร็วการหมุน 200 ถึง 1500 rpm อัตราส่วนการป้อนน้ำต่อเฮปแทน ( $\theta$ ) 1:1 ถึง 5:1 และผิวจานหมุนแบบผิวเรียบ ผิวหยาบ A (36-grit sandpaper) และ ผิวหยาบ B (24-grit sandpaper)

จากผลการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลจะถูกปรับปรุงให้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่า R และค่า  $\theta$  โดยค่าประสิทธิภาพการสกัด และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสูงสุด คือ 69.97% และ  $11.41 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับที่สภาวะ คือ ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s ค่า R เท่ากับ 1000 rpm ค่า  $\theta$  เท่ากับ 1:1 และพื้นผิวหยาบ B ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลของเครื่อง SDR สามารถปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มความขรุขระของผิวจานหมุนอย่างมีนัยสำคัญ

**คำสำคัญ :** การสกัดระบบของเหลว-ของเหลว เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน ประสิทธิภาพการสกัด CFD

**Thesis Title** Study of Liquid-Liquid Extraction Using Spinning Disc Reactor  
**Name - Surname** Mr. Jatupon Yencham  
**Program** Chemical Engineering  
**Thesis Advisor** Assistant Professor Weerinda Appamana, D.Eng.  
**Thesis Co – advisor** Associate Professor Sompong Putivisutisak, Ph.D.  
**Academic Year** 2021

## ABSTRACT

This research aimed to study the benzoic acid extraction from n-heptane with water in a spinning disc reactor (SDR). Benzoic acid and n-heptane are immiscible liquids. The study was divided into two parts: the experiment of the extraction process and the simulation of mixing pattern between water and heptane in SDR by ANSYS Fluent software in order to explain mass transfer efficiency in SDR

The mass transfer efficiency in SDR was presented by film thickness, interfacial area ( $a_{int}$ ), flow pattern of heptane, residence time, velocity profile. The variables of the study were total volumetric flow rate, rotational speed, and disc surface. The conditions in the research were the total volumetric flowrates (Q) of 5 to 15 ml/s, rotational disc speed (R) of 200 to 1500 rpm, water to heptane feeding ratios ( $\theta$ ) of 1:1 to 5:1, and disc with smooth surface, roughness sample A (36-grit sandpaper), and roughness sample B (24-grit sandpaper).

The research result showed that the mass transfer efficiency was enhanced when both R and  $\theta$  were increased. The highest value of extraction efficiency (%E) and volumetric mass transfer coefficient ( $k_L a$ ) were achieved at 69.97% and  $11.41 \text{ s}^{-1}$ , respectively under the total volumetric flow rate of 5 ml/s, rotational disc speed of 1000 rpm and water to heptane flow ratios ( $\theta$ ) = 1:1 by using the roughness sample disc B surface. Therefore, the mass transfer efficiency of SDR could be improved by increasing the roughness of the disc surface significantly.

**Keywords:** liquid — liquid extraction, spinning disc reactor, extraction efficiency, CFD

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรินทร์ดา อ่วมานะ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณทาง บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ในการเอื้อเฟื้อเครื่องมือซูเปอร์คอมพิวเตอร์สำหรับการจำลองกระบวนการ และให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงกระบวนการทำให้การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเหล่าคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย และเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวที่สนับสนุนทั้งกำลังใจ และกำลังทรัพย์ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ที่มีทั้งหมดให้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง

หากงานวิจัยนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใดผู้วิจัยกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้

จตุพล เย็นฉ่ำ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	16
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	17
1.2 วัตถุประสงค์.....	17
1.3 ขอบเขต.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 ระบบการสกัด น้ำ-กรดเบนโซอิก/เฮปแทน.....	19
2.2 ประสิทธิภาพการสกัด (extraction efficiency ; E).....	20
2.3 การถ่ายโอนมวล (mass transfer).....	20
2.4 สมการควบคุมพื้นฐาน (governing conservation equation).....	23
2.5 แบบจำลองความปั่นป่วน SST $k - \omega$ .....	25
2.6 แบบจำลองการไหล VOF (multiphase modeling; volume of fluid).....	27
2.7 ระเบียบวิธีการ Finite volume.....	27
2.8 การดิสครีไทซ์สมการ (discretization schemes).....	28
2.9 กระบวนการหาค่าตอบ (solution algorithm).....	30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.1 วัสดุ และสารเคมี.....	44
3.2 แผนการดำเนินงาน.....	45
3.3 วิธีการทดลอง.....	47
3.3.1 การจำลองด้วยโปรแกรม Ansys fluent.....	47
3.3.2 การทดลองการสกัด.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
4.1 แบบจำลองการคำนวณ (computational model).....	50
4.2 การสอบเทียบแบบจำลองการผสม (validation).....	52
4.3 ผลการจำลองกระบวนการ.....	57
4.3.1 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลรวมต่อรูปแบบการไหลของเฮปเทน.....	57
4.3.2 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลรวมต่อความสูงชั้นฟิล์มของเหลว.....	60
4.3.3 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลรวมต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของสารผสม ...	63
4.3.4 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลรวมต่อเวลาคงอยู่ของสารผสม.....	63
4.3.5 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลรวมต่อโปรไฟล์ความเร็วสารผสม.....	66
4.4 ผลการทดลองการสกัด.....	79
4.4.1 รูปแบบการไหลของเฮปเทนในเครื่อง SDR.....	79
4.4.2 ผลการปรับความเร็วในการหมุน.....	79
4.4.3 ผลการปรับอัตราการไหล.....	81
4.4.4 ผลการปรับอัตราส่วนน้ำต่อเฮปเทน.....	81
4.4.5 ผลการปรับพื้นที่ผิวของจานหมุน.....	85
4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล.....	85



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	87
5.1 สรุปผลงานวิจัย .....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	88
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน.....	95
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการเตรียมสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปแทน.....	97
ภาคผนวก ค การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายกรดเบนโซอิกหลังผ่านกระบวนการสกัด.....	100
ภาคผนวก ง ความเข้มข้นของสารละลายกรดเบนโซอิกหลังผ่านกระบวนการสกัด.....	102
ภาคผนวก จ การคำนวณความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในเฮปแทนที่สภาวะสมดุล.....	105
ภาคผนวก ฉ การคำนวณประสิทธิภาพการสกัด และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล .....	110
ภาคผนวก ช ค่าความขรุขระของกระดาษทราย.....	113
ประวัติผู้เขียน .....	115

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของกรดเบนโซอิก น้ำ และเฮปแทน.....	20
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานการเตรียมโครงงาน.....	45
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขสำหรับการจำลองการไหลภายในเครื่อง SDR.....	47
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ.....	86



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย .....	19
รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนเนื่องจากการพา (convection mass transfer).....	22
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งการวางจุดต่าง ๆ บนปริมาตรควบคุม.....	29
รูปที่ 2.4 จานหมุนที่ใช้ในงานวิจัยของ Wang และคณะ (a) จานหมุนแบบผิวเรียบ และ (b) จานหมุนแบบ spiral grooved .....	33
รูปที่ 2.5 ใบกวนแบบ dual row ultrafine teethed (TR) และแบบ single row (BR) . .....	35
รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเซนแนลที่มีลักษณะการป้อนแบบต่าง ๆ .....	36
รูปที่ 2.7 รูปแบบการแบบต่าง ๆ ที่สามารถพบได้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเซนแนล.....	36
รูปที่ 2.8 ผลการจำลองความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวด้วยโปรแกรม Ansys fluent.....	37
รูปที่ 2.9 รูปแบบการผสมของสีย้อมบนเครื่อง SDR ที่ความเร็วการหมุนค่าต่าง ๆ คือ (a) 200 rpm (b) 600 rpm และ (c) 1000 rpm .....	38
รูปที่ 2.10 การแบ่งประเภทโซนการไหลบนเครื่อง SDR. ....	39
รูปที่ 2.11 รูปแบบการไหลบนเครื่อง RSSDR ช่วงความเร็วการหมุน 50 ถึง 700 rpm .....	40
รูปที่ 2.12 ลักษณะการกระจายตัวของฟองแก๊สในเฟสของเหลวที่ค่าความเร็วการหมุนค่าต่าง ๆ.....	41
รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงสรุปตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัด .....	43
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน.....	44
รูปที่ 3.2 เครื่อง UV-vis spectrophotometer. ....	45
รูปที่ 3.3 ชนิดของจานหมุนที่ใช้ในการทดลอง (ก) แบบผิวเรียบ (ข) แบบผิวหยาบ A และ (ค) แบบผิวหยาบ B. ....	46
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการสกัดด้วยเครื่อง SDR .....	48
รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลอง และการจำลองกระบวนการ .....	49
รูปที่ 4.1 โครงสร้างเครื่อง SDR ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการผสม .....	50
รูปที่ 4.2 การตีเมซสำหรับใช้ในการจำลองกระบวนการผสม .....	51
รูปที่ 4.3 การตั้งค่าขอบเขตของแบบจำลองการผสม. ....	52
รูปที่ 4.4 ผลของการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลต่อเลข $Re_{combine}$ ของสารผสม. ....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วเชิงเส้น (tangential velocity) ของของไหลบนเครื่อง SDR ระหว่างผลที่ได้จากงานวิจัยของ Ong และคณะ กับผลที่ได้จากการจำลองการผสม .....	54
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของเครื่อง SDR ตามงานวิจัยของ J.R. Burn และคณะ .....	56
รูปที่ 4.7 การสอบเทียบโปรไฟล์ความเร็วในแนวรัศมีด้วยงานวิจัยของ J.R. Burn และคณะ .....	57
รูปที่ 4.8 ผลการปรับค่า R ต่อรูปแบบการผสมที่ค่า Q เท่ากับ (ก) 5 ml/s และ (ข) 10 ml/s .....	58
รูปที่ 4.9 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อรูปแบบการผสมที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s; (ก) จานหมุนแบบ ผิว เรียบ (ข) จานหมุนแบบผิวหยาบ A.....	59
รูปที่ 4.10 ผลการปรับค่า R ต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวบนเครื่อง SDR ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s.....	61
รูปที่ 4.11 ผลการปรับค่า Q ต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวบนเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ 200 rpm ..	61
รูปที่ 4.12 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R เท่ากับ 200 rpm; (ก) แบบผิวเรียบ และ (ข) แบบผิวหยาบ A.....	62
รูปที่ 4.13 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R เท่ากับ 1000 rpm; (ก) แบบผิวเรียบ และ (ข) แบบผิว Roughness A.....	62
รูปที่ 4.14 ผลการปรับค่า Q และค่า R ต่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารผสมบนเครื่อง SDR.....	64
รูปที่ 4.15 ผลการปรับค่า Q และค่า R ต่อเวลาคงอยู่ของน้ำ ( $t_{m-water}$ ) บนเครื่อง SDR .....	65
รูปที่ 4.16 ผลการปรับค่า Q และค่า R ต่อเวลาคงอยู่ของเฮปเทน ( $t_{m-heptane}$ ) บนเครื่อง SDR .....	65
รูปที่ 4.17 การแบ่งพฤติกรรมการไหลของสารผสมในเครื่อง SDR ตามลักษณะความสูงของชั้นฟิล์ม ของเหลว .....	66
รูปที่ 4.18 ผลการปรับค่า R ต่อโปรไฟล์ความเร็วในแนวรัศมีของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s.....	67
รูปที่ 4.19 ผลการปรับค่า Q ต่อโปรไฟล์ความเร็วในแนวรัศมีของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ 1000 rpm. ....	67
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $r_s$ และค่า $\lambda$ ที่สภาวะดำเนินการที่ค่าต่าง ๆ.....	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.21 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อโปรไฟล์ความเร็วในแนวรัศมีของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า Q และค่า R เท่ากับ 5 ml/s และ 1000 rpm .....	69
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\epsilon$ กับขนาดของการเกิด eddy ในระบบ .....	71
รูปที่ 4.23 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อค่า $\epsilon$ ของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ 700 ถึง 1500 rpm และค่า Q เท่ากับ 5 ml/s.....	71
รูปที่ 4.24 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อค่า $t_{\text{micro}}$ ของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ 700 ถึง 1500 rpm และค่า Q เท่ากับ 5 ml/s.....	72
รูปที่ 4.25 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่ออัตราเฉือนของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ (ก) 200 rpm (ข) 700 rpm และ (ค) 1500 rpm และค่า Q เท่ากับ 5 ml/s.....	73
รูปที่ 4.26 องค์ประกอบของโปรไฟล์ความเร็วในแนวแกนต่าง ๆ ของสารผสมบนเครื่อง SDR .....	74
รูปที่ 4.27 ผลการปรับค่า Q ต่อค่าอัตราเฉือนของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ 1000 rpm .....	76
รูปที่ 4.28 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่ออัตราเฉือนของสารผสมบนเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ (ก) 200 rpm และ (ค) 1000 rpm.....	75
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนต์ของความเร็วเชิงเส้น ( $dv/dz$ ) กับอัตราเฉือน .....	76
รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบผลการปรับค่า Q ต่อรูปแบบการผสมในเครื่อง SDR ที่ค่า R เท่ากับ 200 ถึง 1500 rpm และ ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s; (ก) การจำลองกระบวนการ และ (ข) การทดลอง.....	80
รูปที่ 4.31 ผลการปรับค่า R และค่า Q ต่อค่า E ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า $\theta$ เท่ากับ 1:1 .....	82
รูปที่ 4.32 ผลการปรับค่า R และค่า Q ต่อค่า $k_L a$ ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า $\theta$ เท่ากับ 1:1.....	82
รูปที่ 4.33 ผลการปรับค่า $\theta$ ต่อค่า E ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R ค่าต่าง ๆ.....	83
รูปที่ 4.34 ผลการปรับค่า $\theta$ ต่อค่า $k_L a$ ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R ค่าต่าง ๆ.....	83
รูปที่ 4.35 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อค่า E ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R ค่าต่าง ๆ.....	84
รูปที่ 4.36 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อค่า $k_L a$ ที่ค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R ค่าต่าง ๆ .....	84

## คำอธิบายสัญลักษณ์

ตัวแปร

$a$

พื้นที่

$\vec{A}$

arbitrary vector

$b$

algebraic source term

$C$

ความเข้มข้นของกรดเบนโซอิก

$E_k$

Ekman number

$\vec{F}$

force per volume

$\vec{g}$

แรงโน้มถ่วง

$h$

ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว

$k$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

$N$

ฟลักซ์เชิงมวลรวม

$P$

ความดัน

$Q$

อัตราการไหลเชิงปริมาตร

$\vec{r}$

position vector

$r$

รัศมี

$Re$

Reynold number

$R$

ความเร็วในการหมุน

$S$

source term

$\vec{S}$

surface vector

$t$

เวลา

$\vec{u}$

ความเร็วสัมบูรณ์

$u$

ความเร็วในแนวรัศมี

$V$

ปริมาตร

## คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

### ตัวแปร(ต่อ)

$\vec{V}$	relative velocity
$X$	แฟรคชั่นเชิงปริมาตร
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์
$\rho$	ความหนาแน่น
$\phi$	ตัวแปรสเกลาร์
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่
$\dot{\gamma}$	อัตราเฉือน
$\varepsilon$	dissipation rate
$\theta$	อัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างน้ำต่อเฮปแทน

### ตัวกำกับบน

$T$	matrix transpose
'	ค่าแก๊
*	การประมาณค่า

### ตัวกำกับล่าง

$B$	จุดด้านล่าง
$com$	combination
$E$	จุดในทิศตะวันออก
$EE$	จุดในทิศตะวันออกสองชั้น
$Film$	ฟิล์มของเหลว
$d$	จานหมุน

## คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

ตัวกำกับล่าง(ต่อ)

<i>ext</i>	external
<i>i</i>	ที่จุดใด ๆ
<i>int</i>	interfacial area
<i>L</i>	ของเหลว
<i>m</i>	ค่าเฉลี่ย
<i>N</i>	จุดในทิศเหนือ
<i>nb</i>	จุดที่อยู่ข้างเคียง
<i>o</i>	frame of reference origin
<i>P</i>	จุดที่สนใจ
<i>PE</i>	จากจุดที่สนใจถึงจุดในทิศตะวันออก
<i>rot</i>	rotational
<i>S</i>	จุดในทิศเหนือ
<i>S</i>	synchronized zone
<i>T</i>	จุดด้านบน
<i>W</i>	จุดทิศตะวันตก
<i>WP</i>	จากจุดในทิศตะวันตกถึงจุดที่สนใจ
<i>WW</i>	จุดในทิศตะวันตกสองชั้น



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการในอุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่เป็นระบบของเหลวสัมผัสกับของเหลวซึ่งจะมีการถ่ายโอนมวลระหว่างเฟส 2 เฟส ยกตัวอย่างเช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) [1] ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่ไนโตรของสารประกอบอะโรมาติก (aromatics nitration) [2] ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) [3] ในกระบวนการที่กล่าวมานี้ กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมีมากที่สุด อาทิเช่น อุตสาหกรรมอาหาร เกษษกรรม และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งอุปกรณ์ผสมดั้งเดิม ยกตัวอย่างเช่น หอสกัดแบบคูนี (Kuhni column) [4] เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซตเลอร์ (mixer-settler) [5] และ หอสกัดแบบกวนผสม (agitated column) [6] กระบวนการเหล่านี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับ พื้นที่ในการติดตั้ง เวลาดำเนินการ และความปลอดภัยในการทำงาน ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์ที่มีความปลอดภัยในการทำงานสูง และมีประสิทธิภาพในการผสมที่ดีจึงเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรม โดยสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ( $k_L a$ )

เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน (spinning disc reactor ; SDR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายทั้งด้านการเกิดปฏิกิริยา และการสกัด ยกตัวอย่างเช่น การผลิตมายองเนส [7] สารละลายแบเรียมซัลเฟต (barium sulfate) [8] และ อนุภาคนาโน (nano particle) [9] เป็นต้น ในปีที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา Appamana และคณะ [10] ได้นำเสนอเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน (SDR) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ น้ำมันปาล์ม น้ำมันที่ใช้แล้ว และเมทานอล (methanol) เป็นสารตั้งต้น จากการทดลองพบว่า ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าผลได้ไบโอดีเซล (fatty acid methyl ester; FAME) สูงถึง ร้อยละ 97.0 โดยใช้เวลาที่สารอยู่ในเครื่อง SDR (residence time) เพียง 2 ถึง 3 s เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (mechanical stirred reactor) ที่ใช้เวลามากกว่าถึง 2,000 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ด้วยการเพิ่มความเร็วการหมุนทำให้บนจานหมุนเกิดชั้นฟิล์มของเหลวที่มีแรงเฉือนสูงซึ่งส่งผลให้ การกระจายตัวของสารตั้งต้น และการถ่ายโอนมวลถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น ต่อมา Yubin Wang และคณะ [11] ได้ศึกษาพฤติกรรมของไหลในเครื่อง SDR ในระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย

เมื่อทำการปรับความเร็วในการหมุน และอัตราการไหล จากการทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็วมอเตอร์ และอัตราการไหลของสารผสมมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เนื่องจากความเร็วการหมุนที่สูงทำให้เกิดแรงเฉือนที่มากพอจนทำให้ตัวทำละลายกระจายตัวในเฟสของเหลวได้อย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลของเครื่อง SDR ยังมีการอธิบายที่ไม่ชัดเจน รวมถึงยังขาดการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่อง SDR ในแนวทางอื่น ๆ ที่นอกเหนือจาก การเพิ่มความเร็วมอเตอร์ในการหมุนและอัตราการไหลของสารในระบบ อาทิเช่น การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของจานหมุน และการปรับตำแหน่งการป้อนสารเข้าเครื่อง SDR เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพการสกัด และการถ่ายโอนมวลในระบบสกัด น้ำ – กรดเบนโซอิก/เฮปแทน ในเครื่อง SDR โดยมีการจำลองรูปแบบการผสมในเครื่อง SDR ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อช่วยอธิบายผลการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลผ่านตัวแปรที่สะท้อนถึงความรุนแรงในการผสม ได้แก่ รูปแบบการผสม (flow pattern) ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว (liquid film thickness;  $h$ ) โปรไฟล์ความเร็วในแนวรัศมี (radial velocity profile) อัตราเฉือนของสารผสม (shear rate;  $\dot{\gamma}$ ) ค่าอัตรา การแยกสลาย (dissipation rate;  $\epsilon$ ) และค่าระยะเวลาการผสมในระดับไมครอน (micromixing time;  $t_{micro}$ ) โดยตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ความเร็วการหมุน อัตราการไหลรวม อัตราส่วนการ ป้อนน้ำต่อ เฮปแทน และลักษณะพื้นผิวของจานหมุน คือ แบบผิวเรียบ แบบผิวหยาบ A (36-grit sandpaper) และแบบ ผิวหยาบ B (24-grit sandpaper)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 จำลองการผสมของระบบน้ำ – เฮปแทน เพื่อช่วยอธิบายถึงประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนด้วยโปรแกรม Ansys Fluent

1.2.2 ศึกษาผลของ ความเร็วการหมุน อัตราการไหล อัตราส่วนการป้อนน้ำต่อเฮปแทน และ ลักษณะพื้นผิวของจานหมุนต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล

1.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพโอนมวลกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ

## 1.3 ขอบเขต

1.3.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล คือ น้ำ — กรดเบนโซอิก/เฮปแทน

1.3.2 ความเร็วการหมุนที่ใช้ในการทดลอง คือ 200 ถึง 1500 rpm

1.3.3 อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง คือ 5 ถึง 15 mL/s

1.3.4 อัตราส่วนการป้อนน้ำต่อเฮปแทน คือ 1:1 3:1 และ 5:1

1.3.5 ลักษณะผิวของจานหมุนที่ใช้ในการศึกษา คือ แบบเรียบ แบบผิวหยาบ A (36-grit sandpaper) และผิวหยาบ B (24-grit sandpaper)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลในเครื่อง SDR ผ่านผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการผสม อาทิเช่น พลวัตกรรมการไหล ลักษณะของชั้นฟิล์มของเหลว และความรุนแรงในการผสมในเครื่อง SDR

1.4.2 ได้แนวทางในการพัฒนาเครื่อง SDR ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองผ่านโปรแกรม Ansys fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

1.4.3 ได้ทราบถึงการดำเนินการด้วยตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการสกัดกรดเบนโซอิก ออกจากสารเฮปแทนด้วยน้ำ



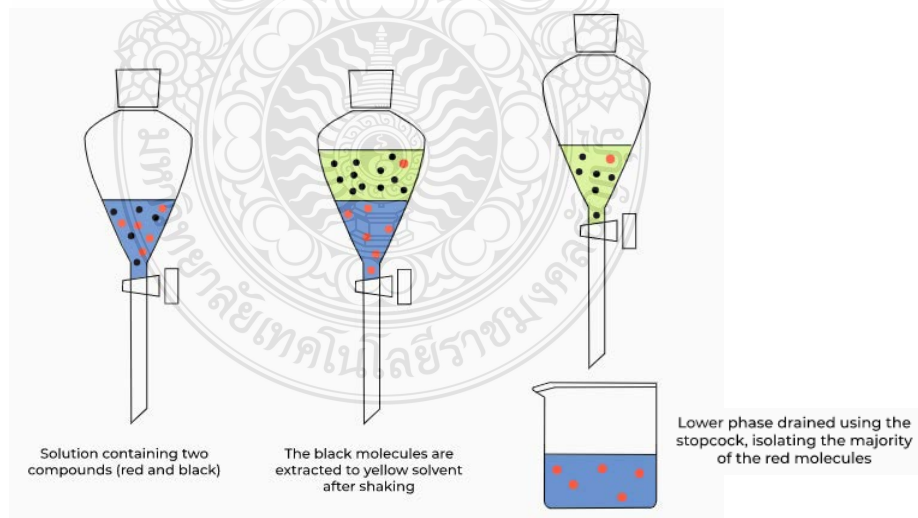
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการรวบรวมข้อมูลที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาเครื่อง SDR จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ รวมถึงการรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของ และประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลของเครื่อง SDR

#### 2.1 ระบบการสกัดด้วย น้ำ-กรดเบนโซอิก/ เฮปแทน

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเทคนิคในการแยกสารที่ต้องการออกจากสารผสม ด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมซึ่งจะกำหนดให้ตัวทำละลายในระบบสกัดนี้เป็นวัฏภาคของเหลว (aqueous phase; AQ ) เพื่อดึงเอาสารที่ต้องการมาอยู่ในวัฏภาคการสกัด (extracted phase or organic phase; ORG ) ส่วนใหญ่จะใช้กับกระบวนการที่เป็น ของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน (immiscible fluids) เช่น น้ำ กับสารละลายอินทรีย์ ความสามารถในการสกัดจะขึ้นกับ ความสามารถในการกระจายตัวระหว่าง สารผสมทั้งสองชนิดในสารละลาย [12]



รูปที่ 2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

ในการวิจัยครั้งนี้จะศึกษาประสิทธิภาพการสกัดและการถ่ายโอนมวลของเครื่อง SDR ระบบที่ใช้ในการศึกษา คือ น้ำ — กรดเบนโซอิก/เฮปเทน โดยให้น้ำเป็นเฟสสกัด (AQ phase) และสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปเทนเป็นเฟสถูกสกัด (ORG phase) สามารถแสดงข้อมูลทางกายภาพ และเคมีเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

**ตารางที่ 2.1** คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมี ของกรดเบนโซอิก น้ำ และเฮปเทน

ชื่อตาม IUPAC	กรดเบนโซอิก	เฮปเทน	น้ำ
สูตรเคมี	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	H <sub>2</sub> O
มวลโมเลกุล	122.12 g/mol	100.21 g/mol	
สถานะ	ผลึกของแข็ง	ของเหลว	ของเหลว
กลิ่น	มีกลิ่นฉุนอ่อน	มีกลิ่นฉุน	ไม่มีกลิ่น
จุดหลอมเหลว	122 °C (395 K)	-90.6 °C (395 K)	0 °C
จุดเดือด	248 °C (522 K)	98.4 °C (371 K)	100 °C
Solubility (g/100 ml)	0.1-1 at 21 °C	0.05 at 21 °C	-
ความหนาแน่น	1320 kg/m <sup>3</sup>	684 kg/m <sup>3</sup>	1000 kg/m <sup>3</sup>
ความหนืด	-	4.09×10 <sup>-4</sup> kg/m-s	1.7894×10 <sup>-5</sup> kg/m-s

## 2.2 ประสิทธิภาพการสกัด (extraction efficiency; E)

ค่าประสิทธิภาพการสกัด (E) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความสามารถในการสกัดสามารถคำนวณได้ดังนี้โดยค่า  $C_{o,e}^*$  สามารถหาค่าได้จากการทดลอง [13].

$$E = \frac{C_{o,e} - C_{o,i}}{C_{o,e}^* - C_{o,i}} \times 100\% \quad (2.1)$$

## 2.3 การถ่ายโอนมวล (mass transfer)

เกิดจากการถ่ายโอนมวลสารในระบบของสารตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไป ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่จากความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย เพื่อให้เกิดความสมดุลในระบบ นอกจากนี้ ความแตกต่างกันของอุณหภูมิ ความดันหรือแรงจากภายนอก ก็สามารถก่อให้เกิดการ

ถ่ายเทมวลสารได้ เช่นกัน การโอนมวลสารเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ การถ่ายโอนมวลสารโดยการแพร่ของโมเลกุล (diffusion mass transfer) และการถ่ายโอนมวลสารโดยการพา (convection mass transfer) โดยถ้าการไหลเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) การถ่ายเทมวลมักเป็นแบบการแพร่ และถ้าการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent flow) การถ่ายเทมวลมักเป็นแบบการพา ในงานวิจัยนี้จะสนใจในส่วนของการถ่ายเทมวลแบบการพามากกว่าการแพร่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหลภายในเครื่องสกัดแบบจานหมุนได้รับอิทธิพลของการปรับความเร็วในการหมุนทำให้มีรูปแบบการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน

พิจารณา รูปที่ 2.2 เมื่อของไหลที่มีความเข้มข้น  $C_{A,\infty}$  เคลื่อนที่ผ่าน ผิวของปริมาตรควบคุม (surface of control volume) ที่มีความเข้มข้น  $C_{A,s}$  อยู่ เมื่อความเข้มข้น  $C_{A,\infty}$  กับ  $C_{A,s}$  ไม่เท่ากันจะทำให้เกิดความต่างของความเข้มข้น หรือแรงขับเคลื่อน (driving force) ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการถ่ายโอนมวล ดังนั้นสามารถเขียนสมการของ ฟลักซ์เชิงมวลรวม (the total mass transfer rate: kmol/s) ที่ถูกถ่ายโอนไปยังของไหลที่ไหลผ่าน ได้ดังสมการนี้ [14]

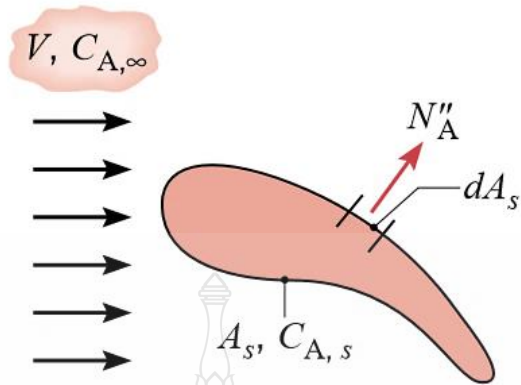
$$N_A = \bar{k}_m A_s (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (2.2)$$

โดยค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเฉลี่ย (the average local mass transfer convection coefficient;  $\bar{k}_m$ ) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\bar{k}_m = \frac{1}{A_s} \int h_m dA_s \quad (2.3)$$

ในงานวิจัยนี้จะสนใจการถ่ายโอนมวลของกรดเบนโซอิกจากเฟสเฮปแทน (ORG phase) ไปยังเฟสน้ำ (AQ phase) ดังนั้นการคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลจึงสนใจปริมาณของกรดเบนโซอิกในเฟสเฮปแทนหลังการสกัดที่สภาวะสมดุล กับที่ได้จากการทดลอง สามารถเขียนสมการที่ 2.2 ใหม่ได้ดังนี้

$$N_A = \bar{k}_L A_s (C_{o,e}^* - C_o) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนมวลเนื่องจากการพา (convection mass transfer)

จากสมการดุลมวลบนจานหมุน เมื่อสมมติให้เครื่อง SDR มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ ปลั๊กซ์ โพล์ว (plug flow) ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$Q_A dy = Q_o dC = N_A a dV \quad (2.5)$$

เมื่อ  $dV = 2H\pi r dr$  เขียนสมการที่ 2.5 ใหม่ได้ดังนี้

$$Q_A dy = Q_o dC = 2N_A a H\pi r dr \quad (2.6)$$

จัดรูปสมการที่ 2.6

$$N_A a = \frac{Q_o dC}{2H\pi r dr} \quad (2.7)$$

นำสมการที่ 2.4 มาเท่ากับ 2.6

$$N_A a = \frac{Q_o dC}{2H\pi r dr} = k_L a (C_{o,e}^* - C_o) \quad (2.8)$$

เมื่อค่า  $k_L a$  คือค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลของเครื่อง SDR ดังนั้นสามารถตั้งค่าขอบเขตของกระบวนการ (boundary condition) สำหรับอินทิเกรตสมการที่ 2.8 เพื่อหาค่า  $k_L a$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} r = 0, C_o &= C_{o,i} \\ r = R_1, C_o &= C_{o,e} \end{aligned}$$

แทนค่าขอบเขตของกระบวนการเพื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.8

$$\int_{C_{o,i}}^{C_{o,e}} \frac{1}{(C_{o,e}^* - C_o)} dC = \frac{k_L a}{Q_o} \int_0^{R_1} 2H\pi r dr$$

$$k_L a = \frac{Q}{H\pi R_1^2} \ln \frac{C_{o,e}^* - C_{o,i}}{C_{o,e}^* - C_{o,e}} \quad (2.9)$$

หลังจากรู้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่อง SDR ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอทฤษฎีสำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม ANSYS Fluent 15.0.7 เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายใน SDR

## 2.4 สมการควบคุมพื้นฐาน (governing conservation equation)

เพื่อจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง SDR จะสามารถเขียนสมการควบคุมพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการการถ่ายโอนโมเมนตัม (momentum equation) ในรูปแบบของเวกเตอร์ตามลำดับได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] \quad (2.11)$$

เนื่องจากการจำลองกระบวนการในครั้งนี้มีสถานะที่รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ตัวแปรในระบบมีค่าไม่คงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของสมการ



ควบคุมจึงนำหลักการ Reynolds decomposition เข้ามาช่วยในการคำนวณโดยการแบ่งตัวแปรในระบบ ออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยที่มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา (steady mean value ;  $\bar{f}$ ) กับส่วนที่เป็น ตัวแทนของความปั่นป่วน (fluctuating component;  $f'$ ) แสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.12

$$f(t) = \bar{f} + f' \quad (2.12)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) จะได้ว่า

$$\bar{\bar{f}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \bar{f}(t) dt = \bar{f} \quad (2.13)$$

$$\bar{f'} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f'(t) dt = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อประยุกต์วิธีการ Reynold decomposition กับ การเฉลี่ยในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง (Time-averaging) กับสมการควบคุมพื้นฐาน สามารถเขียนสมการที่ 2.10 และ 2.11 ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{U}) = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U U) + \nabla(\rho \overline{u'u'}) = -\nabla P + \nabla[\mu(\nabla U + (\nabla U)^T)] \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(U)}{\partial t} + \nabla(U U) + \nabla(\overline{u'u'}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla[\nu(\nabla U + (\nabla U)^T)] + \frac{1}{\rho} \nabla(-\rho \overline{u'u'}) \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$u = U + u' \text{ และ } \bar{u} = U$$

จากสมการที่ 2.17 เทอมสุดท้ายในฝั่งขวามือเป็นพจน์ของ turbulent shear stress ( $\tau$ ) ซึ่งเกิดจากการไหลปั่นป่วนในระบบ ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการที่ 2.17 โดยมีการแทนสมการ  $\tau$  ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial(U)}{\partial t} + \nabla(UU) + \nabla(\overline{u'u'}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla[\nu(\nabla U + (\nabla U)^T)] + \frac{1}{\rho} \nabla(\overline{\tau}) \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\overline{\tau} = -\rho \overline{u'u'} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.18 การเพิ่มเทอมของ turbulent shear stress เข้ามาในสมการโมเมนตัมทำให้ไม่สามารถแก้สมการควบคุมทั้งสองได้ ดังนั้นแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulent model) จึงจำเป็นสำหรับการแก้สมการควบคุมโดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $SST k - \varepsilon$  ในการแก้สมการซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 2.5 แบบจำลองความปั่นป่วน $SST k - \omega$ (turbulent model $SST k - \varepsilon$ )

แบบจำลองความปั่นป่วน  $SST k - \omega$  เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานในการหาค่า turbulent shear stress โดยอาศัย 2 สมการหลักในการแก้ปัญหา คือ สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $k$ ) กับสมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของค่าความปั่นป่วนจำเพาะ ( $\omega$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $k$ )

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta^* k \omega \quad (2.20)$$

สมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของค่าความปั่นป่วนจำเพาะ ( $\omega$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] - \frac{\alpha}{\nu_t} \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta \omega^2 \\ + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2.21)$$

โดยแบบจำลองความปั่นป่วน SST  $k - \omega$  นั้นเป็นส่วนผสมระหว่างแบบจำลอง  $k - \varepsilon$  กับ  $k - \omega$  โดยมีการเพิ่มฟังก์ชัน blending เข้าไปในสมการ โดยถ้าค่า F1 มีค่าเท่ากับ 1 การแก้สมการความปั่นป่วนจะดำเนินการด้วยแบบจำลอง  $k - \omega$  ซึ่งจะให้คำตอบที่แม่นยำเมื่อจำลองการไหลบริเวณใกล้ผนัง และถ้าหากค่า F1 มีค่าเท่ากับ 0 การแก้สมการความปั่นป่วนจะดำเนินการด้วยแบบจำลอง  $k - \varepsilon$  เนื่องจากแบบจำลอง  $k - \omega$  ซึ่งจะให้คำตอบที่แม่นยำสำหรับการจำลองบริเวณที่ห่างออกมาจากผนัง โดยค่า F1 สามารถคำนวณได้ตามรายละเอียดดังนี้

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (2.22)$$

$$\Phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{k}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \left( \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega} y^2} \right) \right] \quad (2.23)$$

$$D_{\omega} = \max \left[ 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2\omega}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right] \quad (2.24)$$

สำหรับการคำนวณค่า  $\mu_t$  สามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณได้ดังนี้

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega F_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (2.25)$$

โดยที่

$$\Omega = \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (2.25)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.26)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (2.27)$$

$$\Phi_2 = \max \left[ 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho \omega y^2} \right] \quad (2.28)$$

## 2.5 แบบจำลองการไหล VOF (multiphase modelling; volume of fluid)

จากงานวิจัยนี้ต้องเกี่ยวข้องกับการไหลของของเหลวมากกว่าหนึ่งวัฏภาค ดังนั้นระเบียบวิธีการ VOF (the volume of fluid) จึงถูกเลือกนำมาใช้งานสำหรับการสร้างแบบจำลองในครั้งนี้ [8] สามารถเขียนสมการ VOF ในรูปแบบของสมการอนุรักษ์ (conservation equation) ได้ดังนี้ เมื่อผลรวมของเฟรคชันเชิงปริมาตร (volume fraction) ของทุกวัฏภาคในแต่ละปริมาตรควบคุมจะต้องเท่ากับหนึ่ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(X_i \rho_i) + \nabla(X_i \rho_i \vec{u}) = S_{x_i} \quad (2.29)$$

$$\sum_i X_i = 1 \quad (2.30)$$

เนื่องจากสมการ VOF นับเป็นหนึ่งในสมการ PDE ดังนั้นจึงต้องใช้ระเบียบวิธีการ finite volume เช่นเดียวกับกับสมการควบคุมพื้นฐานซึ่งจะแสดงรายละเอียดการแก้ไขปัญหาในหัวข้อถัดไป

## 2.6 ระเบียบวิธีการ Finite volume

เนื่องจากสมการควบคุมรวมไปถึงสมการ VOF เป็นสมการ PDE ซึ่งไม่สามารถแก้ไขได้การวิเคราะห์ (analytical method) ดังนั้นระเบียบวิธี finite volume ซึ่งเป็นวิธีการทางตัวเลข (numerical method) ที่จะเปลี่ยนสมการ PDE ให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตจึงถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาโดยสามารถเขียนรูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมพื้นฐานได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y}}_{\text{Convection term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)}_{\text{Diffusion term}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source term}} \quad (2.31)$$

ในการคำนวณจะเริ่มด้วยการอินทิเกรตสมการที่ 2.14 ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม

$$\int \left[ \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} \right] dV = \int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \right] dV \quad (2.32)$$

จากทฤษฎีของ Stoke's

$$\oint \nabla \vec{A} dV = \oint \vec{A} d\vec{S} \quad (2.33)$$

ดังนั้น

$$\oint \frac{\partial}{\partial x} (\rho \phi) dV + \oint (\rho \phi \vec{n}) \cdot d\vec{S} = \oint \Gamma_\phi \nabla_\phi \cdot d\vec{S} + \int S_\phi dV \quad (2.34)$$

ในหัวข้อถัดไปจะทำการดิสครีไทซ์ (discretized) สมการที่ 2.34 ให้อยู่ในรูปแบบของสมการพีชคณิตซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.35)$$

## 2.7 การดิสครีไทซ์สมการ (discretization schemes)

จากสมการการถ่ายโอนซึ่งแสดงในสมการที่ 2.31 นั้นประกอบด้วย เทอมการพา (convection term) และเทอมการแพร่ (diffusion term) การดิสครีไทซ์สมการที่ 2.31 ลงบนจุดต่อต่าง ๆ ตามตำแหน่งบนปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะต้องทำการแยกอินทิเกรตในแต่ละเทอม โดยกำหนดให้  $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$  และ  $A_n = A_s = \Delta x \times 1$  ดังนั้นสามารถแสดงผลของการดิสครีไทซ์ในแต่ละเทอมได้ดังนี้

1). เทอมการพา (convection term)

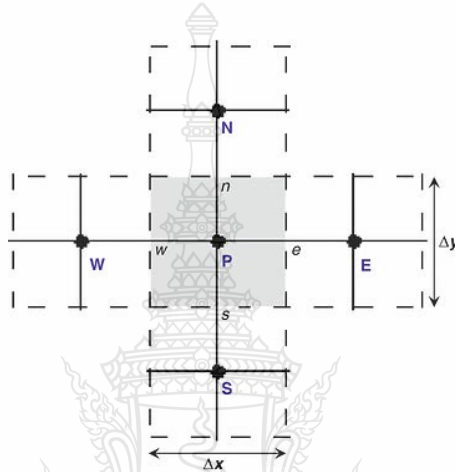
$$\int \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.36)$$

$$\int \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dV = (\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.37)$$

2). เทอมการแพร่ (diffusion term)

$$\int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] dV = \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) \quad (2.38)$$

$$\int \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV = \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_n - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_s = D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S) \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการวางจุดต่าง ๆ บนปริมาตรควบคุม

เนื่องจากสมการอธิบายพฤติกรรมการไหลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear partial differential equations) ดังนั้นในการดิสครีไทซ์สมการที่ 2.31 จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการอินเตอร์โพล (interpolation) ที่เรียกว่า QUICK scheme (quadratic upstream interpolation for convective kinetics scheme) [15] ซึ่งจะใช้วิธีการประมาณค่าจากค่าของตัวแปรจากเซลล์ข้างเคียงถึงสี่จุดจึงทำให้ลดความไม่เป็นเชิงเส้น และช่วยให้การประมาณค่ามีความแม่นยำมากขึ้น จากสมการที่ 3.6 สามารถเขียนสมการดิสครีไทซ์เมื่อใช้การประมาณค่าแบบ QUICK ได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_{EE} \phi_{EE} + a_{WW} \phi_{WW} \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$F_e = (\rho u)_e$$

$$F_w = (\rho u)_w$$

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{pe}}$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{wp}}$$

$$a_E = D_e + \frac{3}{8}\alpha_e F_e - \frac{6}{8}(1 - \alpha_e)F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w)F_w$$

$$a_W = D_w + \frac{6}{8}\alpha_w F_w - \frac{1}{8}\alpha_e F_e - \frac{3}{8}(1 - \alpha_w)F_w$$

$$a_{EE} = \frac{1}{8}(1 - \alpha_e)F_e$$

$$a_{EW} = -\frac{1}{8}(\alpha_w)F_w$$

$$a_P = a_E + a_W + a_{EE} + a_{WW} + (F_e - F_w)$$

$$\alpha_w = 1 \text{ for } F_w > 0 \text{ and } \alpha_e = 1 \text{ for } F_e > 0$$

$$\alpha_w = 0 \text{ for } F_w < 0 \text{ and } \alpha_e = 0 \text{ for } F_e < 0$$

## 2.8 กระบวนการหาคำตอบ (Solution algorithm)

การหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equation) [16] เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณความเร็ว และความดัน เพื่อทำให้ค่า  $u$  และ  $v$  ที่คำนวณได้จากสมการโมเมนตัมนั้น สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องโดยการใช้ค่าตัวแปรที่กำหนดขึ้น (Guessed variable) และค่าตัวแปรแก้ไข (correction variable) ในการคำนวณค่าความดัน ( $p$ ) และความเร็วในแต่ละทิศทาง ( $u$ ,  $v$  และ  $w$ ) ใหม่ เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้นสามารถแสดงรายละเอียดการเขียนสมการความดันแก้ไข (Pressure-correction equation) ได้ดังนี้

$$a_p p'_p = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + a_T p'_T + a_B p'_B + b \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z, \quad (2.42)$$

$$a_W = \rho_w d_w \Delta y \Delta z,$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta x \Delta z,$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta x \Delta z,$$

$$a_T = \rho_t d_t \Delta x \Delta z,$$

$$a_B = \rho_b d_b \Delta x \Delta z,$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B$$

$$b = \frac{(\rho_p^0 - \rho_p) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \Delta z + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x \Delta z + [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t] \Delta x \Delta z$$

สามารถสรุปขั้นตอนของกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1). เริ่มต้นสมมติค่าของ  $p'$
- 2). แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อคำนวณหาค่า  $u^*$   $v^*$  และ  $w^*$
- 3). แก้สมการความดันแก้ไขเพื่อคำนวณหาค่า  $p'$  และ  $p$
- 4). คำนวณค่า  $u$   $v$  และ  $w$  จากสมการค่าแก้ไขความเร็ว (velocity correction)

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_p - p'_E)$$

$$u_n = v_n^* + d_n (p'_p - p'_N)$$

$$u_t = w_t^* + d_t (p'_p - p'_T)$$

- 5). แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ
- 6). คำนวณค่า  $p$  และ  $p'$  ใหม่
- 7). ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนกว่าค่า  $u$   $v$  และ  $w$  จะเป็นค่าที่ถูกต้อง



## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

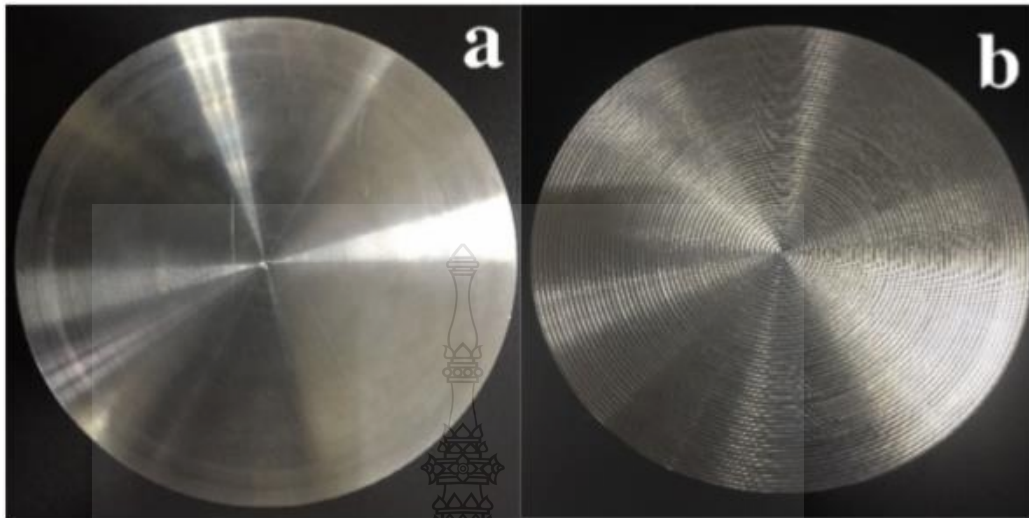
ในส่วนนี้จะรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้เป็นข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาโดยจะทำการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับ ประโยชน์และการทำงานของ SDR และถึงปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ ในกลุ่มของถึงปฏิกรณ์แรงเฉือนสูง (high shear reactor) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน รวมถึงการนำ SDR ไปใช้กับระบบ ของเหลว-ของเหลว และของเหลว-แก๊ส

### 2.9.1. เครื่องปฏิกรณ์แรงเฉือนสูง (high shear reactor)

ในอุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับของกระบวนการทางเคมีที่มีของไหลมากกว่าหนึ่งเฟส หรือของไหลที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน (immiscible fluids) ซึ่งบ่อยครั้งในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิตเราจำเป็นต้องควบคุมความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ เช่น กระบวนการแยก (separation) หรือ กระบวนการสกัด (extraction) เพื่อแยกเอาสารตั้งต้นที่เหลือหรือผลิตภัณฑ์ที่เราไม่ต้องการ (by product) ออกจากสารผลิตภัณฑ์ ดังนั้นอุปกรณ์ในกลุ่มถึงปฏิกรณ์แรงเฉือนสูง (high shear reactor) จึงเป็นตัวเลือกที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน

#### 1. เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน (SDR)

เครื่อง SDR เป็นเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบันเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) จากการหมุนของแผ่นดิสก์ สร้างชั้นฟิล์มของเหลว (liquid film thickness) ที่มีแรงเฉือนสูง ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลขึ้นภายในชั้นฟิล์ม โดยเครื่อง SDR สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายโอนมวลได้จากการปรับความเร็วการหมุน และการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของแผ่นดิสก์ โดย Wang และคณะ [17]. ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัด (extraction efficiency) ระหว่างแผ่นดิสก์แบบผิวเรียบ และแผ่นดิสก์แบบเกลียวหมุน (spiral grooved disc) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ผลที่ได้พบว่า แผ่นดิสก์แบบเกลียวหมุนให้ค่าประสิทธิภาพการสกัดที่ดีกว่าเนื่องจากภายในร่องของเกลียวหมุนของเหลวจะเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (eddy flow) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสและการผสมถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น



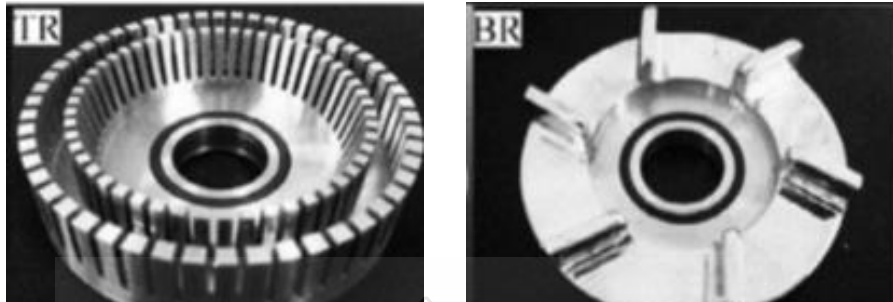
รูปที่ 2.2 แผ่นดิสก์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Wang และคณะ (a) แผ่นดิสก์แบบผิวเรียบ (b) แผ่นดิสก์แบบเกลียวหมุน

เครื่องสกัด SDR นอกจากการประยุกต์ใช้งานสำหรับกระบวนการสกัดแล้ว ในด้านการเกิดปฏิกิริยาเคมีก็สามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงเช่นเดียวกัน โดย chen และคณะ [18] ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล (biodiesel) ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) จากน้ำมันถั่วเหลือง (soy bean oil) และเมทานอล ด้วยเครื่อง SDR โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การเพิ่มความเร็วการหมุนของ (rotational disc speed) สามารถปรับปรุงค่าร้อยละผลได้ไบโอดีเซล จากร้อยละ 71.7 เป็นร้อยละ 91 ที่ความเร็วการหมุนเพิ่มขึ้นจาก 300 rpm เป็น 2400 rpm และเมื่อเพิ่มอัตราการไหล เป็น 773 ml/min จะทำให้ ค่าร้อยละผลได้ของ FAME ถูกปรับปรุงเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 96.9 เมื่อเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ พบว่าให้ค่าร้อยละผลได้ของ FAME ใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อหมุน (rotating tube reactor) เครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งแบบท่อหมุน (rotating packed bed reactor) และเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal contactor separator) คือ ร้อยละ 97.65 97.3 และ 96 ตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะพบว่าเครื่อง SDR ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ น้อยกว่า 0.1 s และให้อัตราการผลิตค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ คือ ที่อัตราการผลิต 1.86 mol/s

นอกจากนี้เครื่อง SDR ยังถูกนำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการเกิดอิมัลชัน (emulsion) ในอุตสาหกรรมอาหาร โดย Akhtar และคณะ [7] ได้ใช้เครื่อง SDR ในการศึกษาผลของการถ่ายโอนความร้อนและประสิทธิภาพการผสม ในกระบวนการผลิตมายองเนส (mayonnaise) ผลที่ได้พบว่า ขนาดอนุภาคที่พบว่ามีขนาดอยู่ในช่วง 6 ถึง 9  $\mu\text{m}$  ซึ่งเล็กกว่าขนาดอนุภาคที่พบว่ามีขนาดอยู่ในช่วง 25  $\mu\text{m}$  เมื่อพิจารณาความเสถียรภาพในการเกิดอิมัลชันระหว่างน้ำมันกับน้ำพบว่า มายองเนสที่ได้จากเครื่อง SDR ค่อนข้างมีเสถียรภาพถึงแม้จะมีการเก็บเป็นระยะเวลา นานมากกว่า 10 วัน ขนาดของอนุภาคในมายองเนสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สุกท้ายเมื่อทำการทดสอบเรื่องรสชาติของมายองเนสที่ได้จากเครื่อง SDR พบว่ามี ความสม่ำเสมอ (consistency) และความเป็นครีม (creaminess) ของเนื้อมายองเนสอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ถ้ามองในแง่ของประสิทธิภาพการผลิตพบว่าเครื่อง SDR ใช้ระยะเวลาในการผลิตที่น้อยกว่า และใช้พลังงานในการพาสเจอร์ไลส์ (pasteurize) ที่น้อยกว่ากระบวนการทั่วไป รวมถึงสามารถควบคุมขนาดอนุภาคในมายองเนสได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

## 2) เครื่องปฏิกรณ์แบบโฮโมจีไนเซอร์ (homogenizer or high shear mixer; HSM)

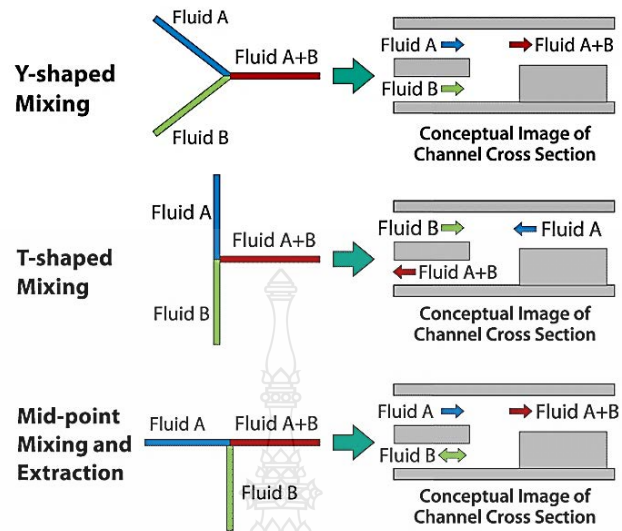
เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (HSM) เป็นถังปฏิกรณ์ที่สร้างแรงเฉือนสูง เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ SDR ด้วยเหตุนี้เครื่อง HSM จึงนิยมนำไปใช้กับกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการผสมของไหลที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน (immiscible fluid) การทำงานของเครื่อง HSM คือ ใช้การหมุนด้วยความเร็วสูงของโรเตอร์ (rotor) ก่อให้เกิดแรงเฉือนสูงภายในช่องระหว่างโรเตอร์-สเตเตอร์ โดยที่สเตเตอร์ (stator) จะมีการเจาะรูขนาดเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มแรงเฉือนให้แก่ของเหลวที่ไหลผ่านทำให้อนุภาคของของเหลวแตกตัวได้ละเอียดขึ้น ในปัจจุบันมีนักวิจัยมากมายที่สนใจศึกษาประสิทธิภาพของเครื่อง HSM โดย Hongyun Qin และคณะ[19] ได้ศึกษาการใช้เครื่อง HSM กับ การเกิดปฏิกิริยาไอโอดัด - ไอโอเดรต (iodide-iodate) ซึ่งจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมระหว่างหัวโรเตอร์สองชนิด คือ แบบ dual-row ultrafine-teethed กับ แบบ single row ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในช่วงความเร็วรอบ 50 ถึง 300 rpm จากการทดลองพบว่าโรเตอร์แบบ single row จะให้ประสิทธิภาพการผสมที่ดีกว่าแบบ dual-row ultrafine-teethed โดยโรเตอร์แบบ single row มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (mass transfer coefficient;  $k_L a$ ) ในช่วง 0.18 ถึง 2.33  $\text{s}^{-1}$  และโรเตอร์แบบ dual-row ultrafine-teethed row จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในช่วง 0.28 ถึง 2.68  $\text{s}^{-1}$



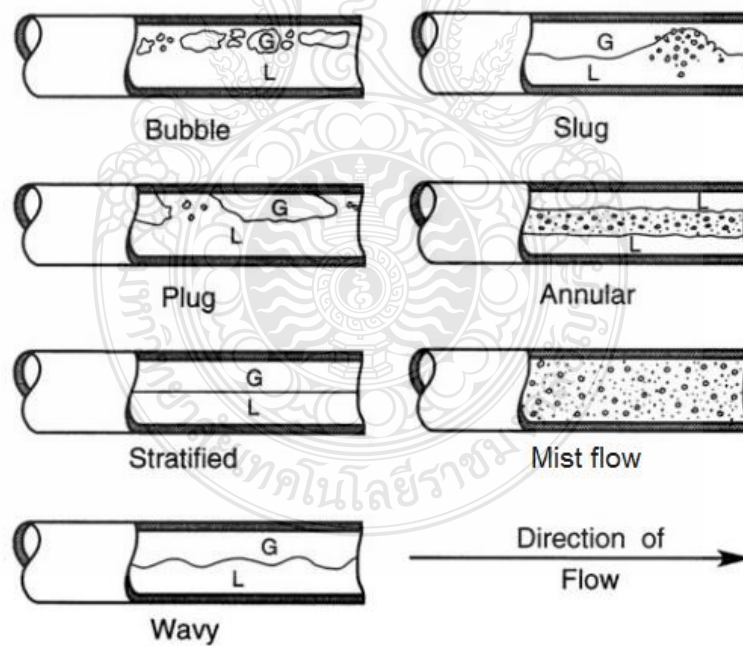
รูปที่ 2.3 ใบกวนแบบ dual-row ultrafine-teethed (TR) และ แบบ single row (BR) [18]

### 3) ถังปฏิกรณ์แบบไมโครแชนแนล (microchannel reactor)

ถังปฏิกรณ์แบบไมโครแชนแนล เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีองค์ประกอบเป็นท่อขนาดเล็กมาก ๆ ซึ่งจะมีลักษณะต่างออกไปตามรูปแบบการป้อนดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยจุดเด่นของถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ คือ สามารถดำเนินการแบบต่อเนื่องได้ (continuous operation) มีการผสมที่ดี และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงเมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ดั้งเดิม โดยการทำงานของถังปฏิกรณ์ชนิดนี้จะมีการป้อนสารสองชนิดเข้าพร้อมกันซึ่งจะอาศัยแรงเฉือนของการป้อนของไหลที่มากพอที่จะสามารถแพร่สาร A เข้าไปในสาร B ได้ โดยรูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบไมโครแชนแนลจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อน (feed rate) ความดันลด (pressure drop) และแรงตึงผิวของของไหล ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 6 แบบ คือ การไหลแบบฟอง (bubble flow) การไหลแบบสลัก (slug flow) การไหลแบบวงแหวน (annular flow) การไหลแบบคลื่น (wavy flow) การไหลแบบขนาน (stratified flow) และการไหลแบบปลั๊กซีโฟลว์ (plug flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 Mehdi S. และคณะ [20] ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลภายในถังปฏิกรณ์แบบไมโครแชนแนลที่มีหัวป้อนเป็นรูปตัว T (T-junction microchannel) โดยมีการเติมสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate: SDS)



รูปที่ 2.4 ถังปฏิกรณ์แบบไมโครเซนแนลที่มีลักษณะการป้อนแบบต่าง ๆ [21]

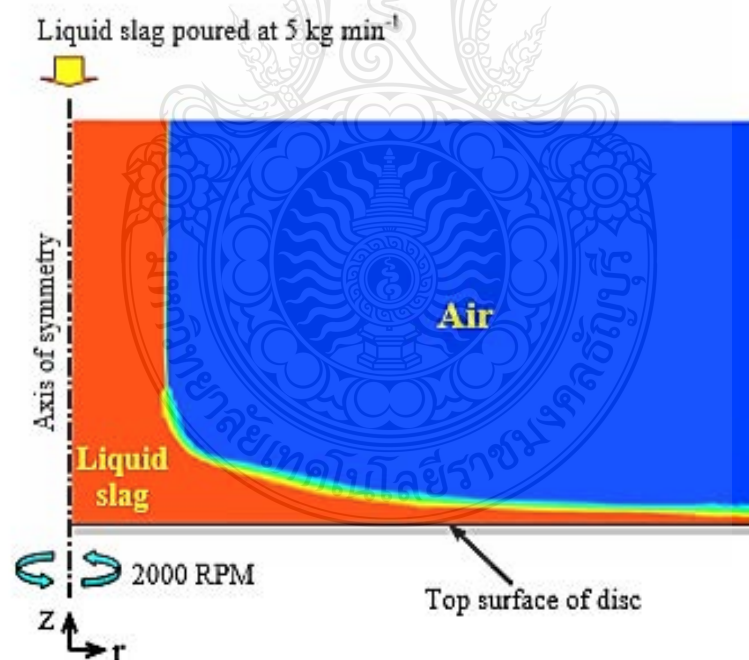


รูปที่ 2.5 รูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ ที่สามารถพบได้ในถังปฏิกรณ์แบบไมโครเซนแนล [22]

จากการทดลองพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิว (sodium dodecyl sulphate; SDS) สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (the overall mass transfer coefficient;  $k_{La}$ ) ได้ถึงร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติมสาร SDS โดยการที่ค่า  $k_{La}$  เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากแรงตึงผิวของสารละลายที่ลดลงทำให้การกระจายตัวระหว่างสารสองชนิดที่มีลักษณะแบบ slug flow ภายในท่อเพิ่มขึ้น

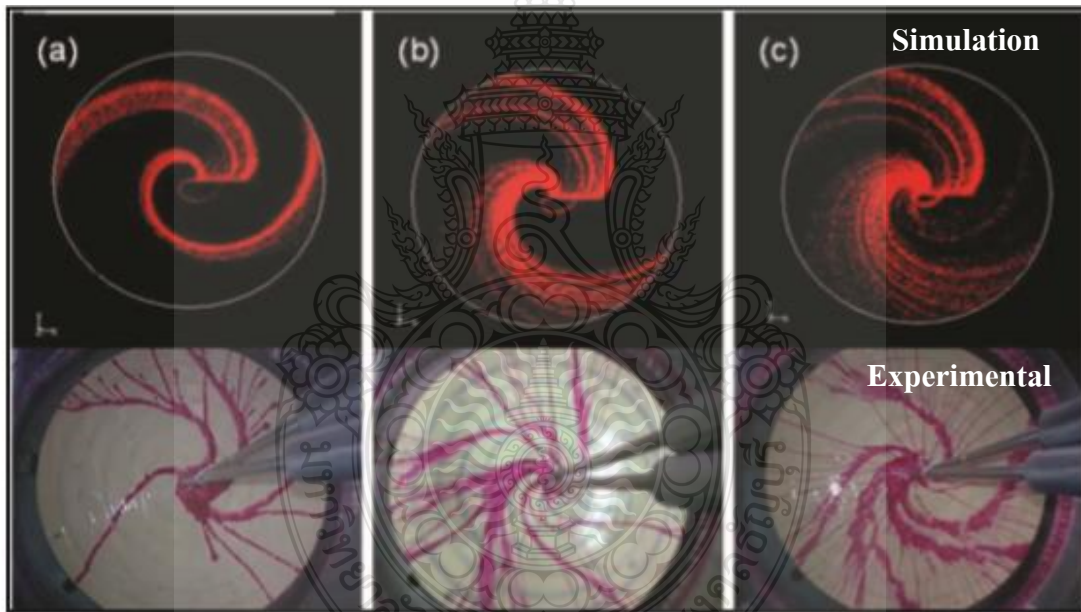
#### 2.9.4 การใช้โปรแกรม Fluent จำลองกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับเครื่อง SDR

ตามทีกล่าวไปข้างต้นเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน(SDR) เป็นเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบันด้วยความสามารถที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็น การผสม การเกิดปฏิกิริยาเคมี รวมถึงนำไปใช้ในกระบวนการสกัด เป็นต้น โดย Pan และคณะ [23] ได้สร้างแบบจำลอง CFD (computational fluid dynamics) สำหรับเครื่อง SDR ในการศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวที่มีความหนืดสูง (0.7 ถึง 1.05 Pa.s) เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยในการจำลองจะใช้โปรแกรม Ansys Fluent ในการจำลองชั้นฟิล์มของเหลวบนเครื่อง SDR ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลการจำลองชั้นฟิล์มของเหลวด้วยโปรแกรม Ansys fluent. [18]

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าเราสามารถวัดความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวได้โดยวัดระยะห่างจากผิวจานหมุนถึงบริเวณอินเทอร์เฟซ (interface) ระหว่างของเหลว และอากาศ โดยผลการทดลองที่ได้พบว่า การเพิ่มอัตราการป้อน (feeding flow rate) หรือ ความหนืด (viscosity) ของของเหลว (density) ร้อยละ 50 จะทำให้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 และ 12 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของของเหลวพบว่าค่าความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวจะมีค่าลดลงร้อยละ 27 นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มหรือลดค่าแรงตึงผิวของของเหลว (surface tension) จะไม่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม ต่อมา Majnus และคณะ [24] ได้ใช้โปรแกรม Ansys fluent ทำการจำลองการผสมภายในเครื่อง SDR ที่ความเร็วการหมุนค่าต่าง ๆ คือ 200 rpm 600 rpm และ 1000 rpm โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาคือ น้ำกับสีย้อม (red dye tracer) โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.7

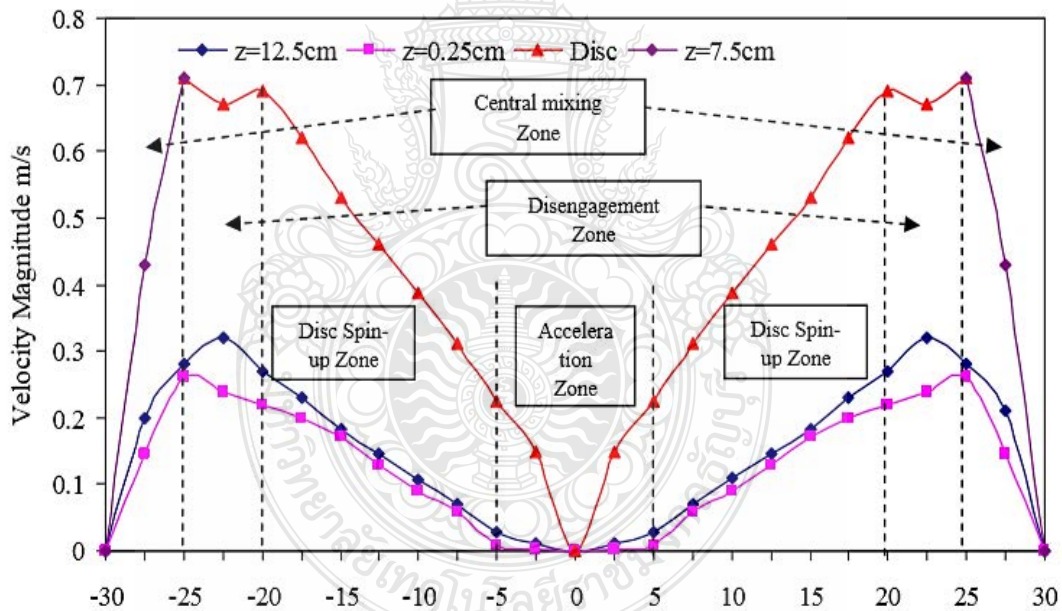


รูปที่ 2.7 รูปแบบการผสมของสีย้อมบนเครื่อง SDR ที่ความเร็วรอบค่าต่าง ๆ คือ (a) 200 rpm (b) 600 รอบต่อนาที และ (c) 1000 rpm

จากรูปที่ 2.7 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในหมุนจะทำให้พื้นที่การกระจายตัวของสีย้อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการผสมระหว่างการทดลอง และการจำลองกระบวนการพบว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งรูปแบบการผสมนี้สามารถบอกได้ถึงความสามารถในการ

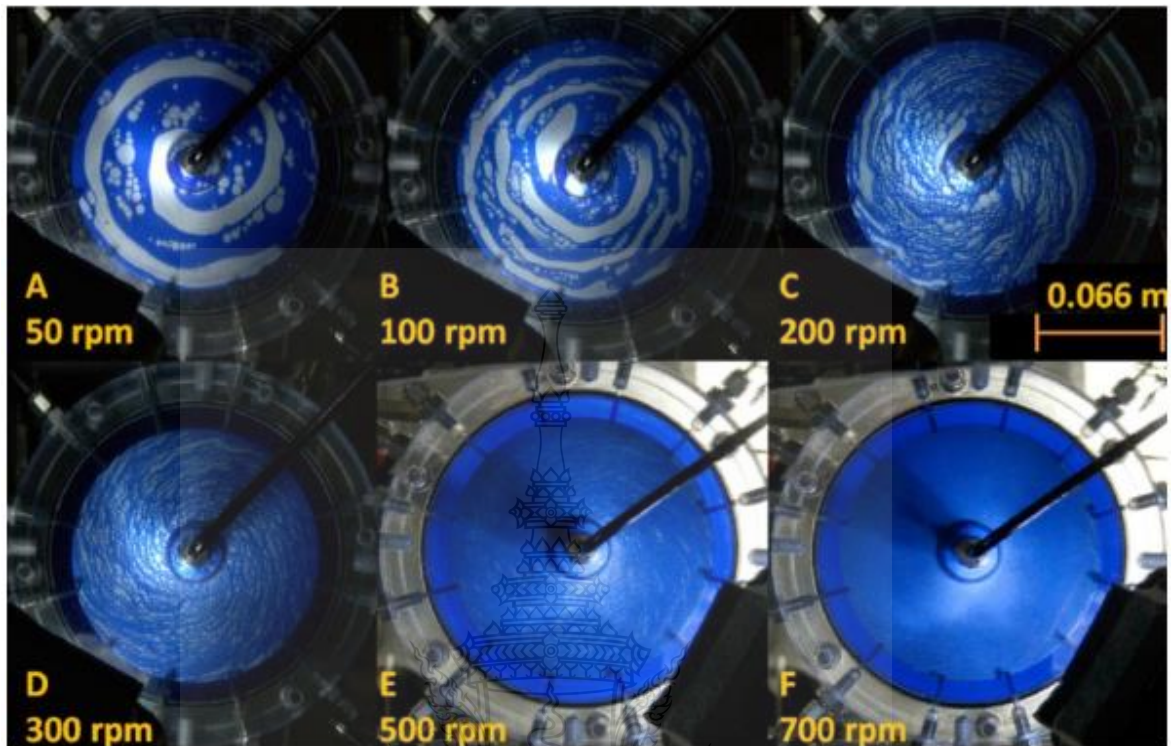
ผสมของเครื่อง SDR ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ Bhatelia และคณะ [25] ได้ใช้แบบจำลอง CFD ของเครื่อง SDR ในการศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มของเหลว และรูปแบบการผสมที่สภาวะต่าง เช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้านี้ แต่ข้อมูลที่น่าสนใจที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ คือ การใช้โปรแกรม Ansys fluent ในการหาโปรไฟล์ความเร็วของของไหลบนเครื่อง SDR ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากโปรไฟล์ความเร็วในการไหล ทำให้สามารถแบ่งประเภทการไหลบนเครื่อง SDR เป็น 4 โซน ดังนี้ คือ

- (1). Acceleration zone : จะเป็นโซนที่อยู่บริเวณจุดป้อนของเครื่อง SDR
- (2). Disc spin – up : ซึ่งจะเป็นโซนที่แสดงพฤติกรรมของการไหลบนเครื่อง SDR
- (3). Central mixing zone : เป็นโซนที่อยู่ระหว่างพื้นผิวของจานหมุน กับ บริเวณผนังด้านนอกของเครื่อง SDR
- (4). Disengagement zone : เป็นบริเวณที่ของเหลวหลุดออกจากขอบของจานหมุน



รูปที่ 2.8 การแบ่งประเภทโซนการไหลบนเครื่อง SDR [25]

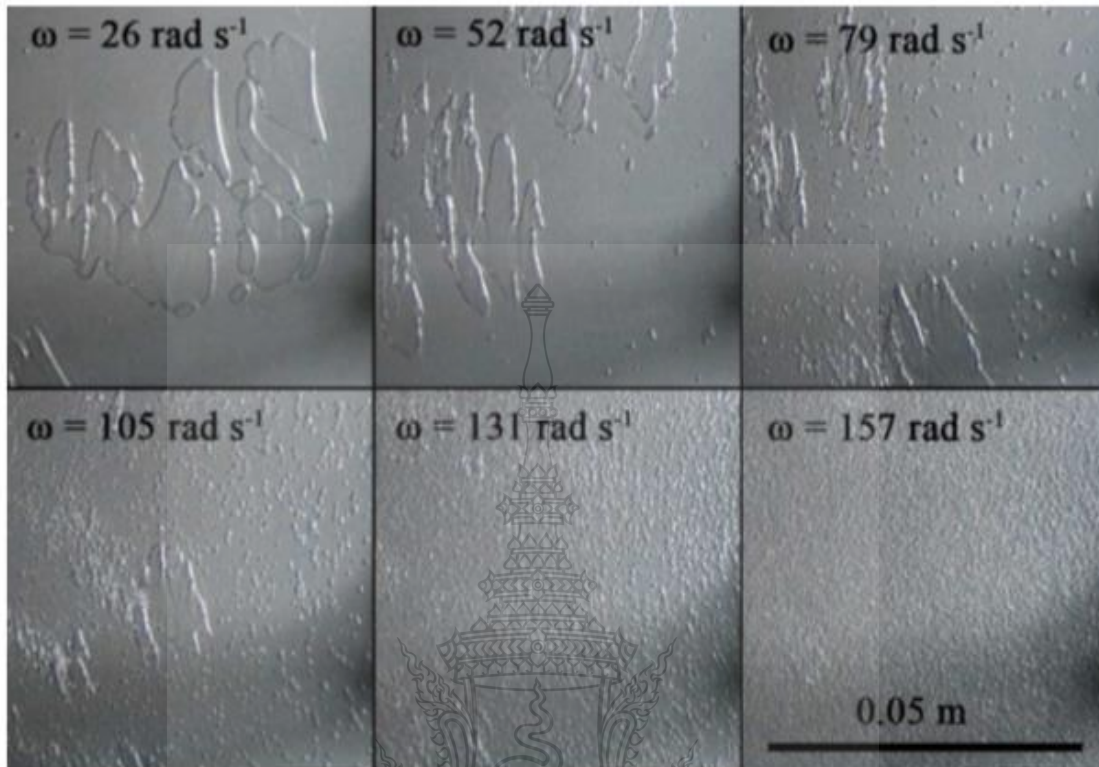




รูปที่ 2.9 รูปแบบการไหลในเครื่อง RSSDR ช่วงความเร็วรอบ 50 ถึง 700 rpm [26]

### 2.9.3 การศึกษาการถ่ายโอนมวลด้วยเครื่อง SDR

F.Visscher และคณะ [27] ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลระหว่างของเหลว-ของเหลวในระบบการสกัดกรดเบนโซอิกจากสารเฮปแทนด้วยน้ำโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โรเตอร์ – สเตเตอร์ (Rotor stator spinning disc reactor; RSSDR) ในช่วง ความเร็วการหมุน 100 ถึง 1600 rpm จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบการไหลของสารผสมจะเปลี่ยนไปตามความเร็วรอบในการหมุนโดยสามารถจำแนกได้เป็นสามแบบ คือ ที่ความเร็วรอบต่ำกว่า 100 rpm จะพบรูปแบบการไหล แบบเกลียวหมุนต่อเนื่อง (continuous spiraling flow) ที่ความเร็วรอบในช่วง 100 ถึง 300 rpm รูปแบบการไหล แบบเกลียวหมุนบางส่วน (spiraling droplet flow) และที่ความเร็วมากกว่า 300 rpm รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนเป็น แบบการกระจายตัวเต็มที่ (fully dispersed flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



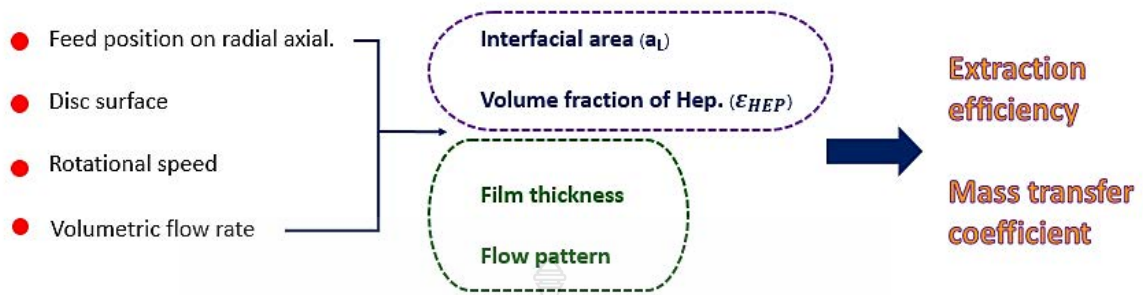
รูปที่ 2.10 ลักษณะฟองแก๊สในเฟสของเหลวที่ค่าความเร็วรอบค่าต่าง ๆ

นอกจากการศึกษารูปแบบการไหลภายในเครื่อง RSSDR ยังมีการศึกษาผลของความเร็ว ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (volumetric mass transfer coefficient :  $k_L a$ ) ผลที่ได้ คือ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจะให้ค่า  $k_L a$  เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉือนภายในชั้นฟิล์มของเหลว (liquid film thickness) บนโรเตอร์เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวระหว่างสารผสม และการหมุนวน (recirculation) ของสารผสมภายในชั้นฟิล์มนี้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยค่า  $k_L a$  ที่วัดได้จากการทดลองครั้งนี้ คือ  $0.17 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $51.47 \text{ s}^{-1}$  ที่ช่วงความเร็วรอบ 50 ถึง 1600 rpm

Marco Meeuwse และคณะ [28] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนโรเตอร์ – สเตเตอร์ (rotor stator spinning disc reactor; RSSDR) สำหรับการใช้งานในระบบ ของเหลว – แก๊ส โดยศึกษาถึงผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ รัศมีของโรเตอร์ (rotor radius) อัตราการไหลของของเหลว (liquid volumetric flow) ความเร็วรอบ (rotational disc speed) และระยะห่างโรเตอร์-สเตเตอร์ (rotor-stator distance) ต่ออัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างของเหลว-แก๊ส

การทดลองจะควบคุมความเร็วรอบในช่วง 50 ถึง 250 rpm ระยะห่างระหว่าง โรเตอร์-สเตเตอร์ ที่ 1 ถึง 5 ml/s และรัศมีของโรเตอร์ ที่ 0.066 และ 0.135 m จากผลการทดลองพบว่า การดำเนินการที่ความเร็วรอบต่ำกว่า 70 rpm จะพบลักษณะของแก๊สในของเหลว แบบฟองแก๊สยาว (elongated gas bubbles) ที่มีขนาดกว้างกว่าระยะห่างระหว่าง โรเตอร์-สเตเตอร์ และที่ความเร็วรอบมากกว่า 100 rpm จะพบลักษณะของแก๊สในของเหลว แบบฟองแก๊สทรงกลม (spherical gas bubbles) ซึ่งจะมีขนาดเล็กลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (volumetric mass transfer coefficient :  $k_{La}$ ) พบว่า จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเร็วรอบ และมีแนวโน้มที่ลดน้อยลงเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งแนวโน้มของค่า  $k_{La}$  สอดคล้องกับการทดลองของ F.Visscher และคณะ [27] ที่ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลของเครื่องปฏิกรณ์ RSSDR โดยได้ให้เหตุผลว่าการเพิ่มความเร็วยุโรปเทียบได้กับการเพิ่มแรงเฉือนภายในเครื่องปฏิกรณ์ และการเพิ่มอัตราการไหลเทียบได้กับการลดเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time) โดยค่า  $k_{La}$  สูงสุดในงานวิจัยนี้ คือ  $2.5 \text{ s}^{-1}$  ที่ความเร็วการหมุน 250 rpm และอัตราการไหลของสารป้อนคือ  $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

Haseidl และคณะ [29] ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่อง SDR สำหรับการใช้งานใน ระบบ น้ำ-แก๊สอาร์กอน การทดลองจะศึกษาผลของการปรับความเร็วรอบของแผ่นดิสก์ และการปรับอัตราการไหลของน้ำ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (the volumetric mass transfer coefficient;  $k_{La}$ ) โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการดำเนินการด้วยแผ่นดิสก์สองแบบ คือ แบบผิวเรียบ (smooth disc) กับแบบแผ่นดิสก์ที่มีการเจาะรู (perforated disc) ซึ่งจะทำให้การป้อนแก๊สอาร์กอนผ่านทางรูของแผ่นดิสก์ ผลการทดลองที่ได้พบว่าการดำเนินการที่ความเร็วการหมุนสูงกว่า 100 rpm การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ จะส่งผลให้เวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง และชั้นฟิล์มของเหลว (liquid film thickness) บนแผ่นดิสก์สูงขึ้น จึงทำให้ค่า  $k_{La}$  มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อดำเนินการที่ความเร็วการหมุนต่ำพบว่า จะมีแนวโน้มของค่า  $k_{La}$  ที่ตรงกันข้ามกับการดำเนินการที่ความเร็วรอบสูง ต่อมาเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผ่นดิสก์ทั้งสองแบบพบว่า แผ่นดิสก์แบบเจาะรูจะให้ค่า  $k_{La}$  สูงกว่าแบบแผ่นดิสก์ผิวเรียบเนื่องจากการป้อนแก๊สอาร์กอนผ่านทางรูบนแผ่นดิสก์จะทำให้การกระจายตัวของแก๊สอาร์กอนในชั้นฟิล์มของเหลวถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการสรุปตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด

จากผลการศึกษการถ่ายโอนมวลในเครื่อง SDR ซึ่งรวบรวมมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดดังแสดงในรูปที่ 2.11 แต่จากผลการศึกษาข้างต้นยังไม่เพียงพอสำหรับทำความเข้าใจถึงรูปแบบการผสมภายในเครื่อง SDR เพื่อที่จะสามารถอธิบายผลของการผสมที่สภาวะต่าง ๆ ให้ชัดเจนขึ้น ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงจะมีการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรม Fluent เพื่อช่วยอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง SDR เพื่อใช้ในการศึกษาร่วมกับการทดลอง



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

##### 3.1.1 สารเคมี

- 1) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid)
- 2) น้ำ (H<sub>2</sub>O)
- 3) เฮปเทน (n- Heptane 99.5% AR-grade)

##### 3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) เครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุนแสดงดังรูปที่ 3.1 ถึง 3.3
- 2) เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer Jasco V-530)
- 3) เครื่องไตเตรทอัตโนมัติรุ่น ABC
- 4) ขวดปรับปริมาตร
- 5) ปีกเกอร์
- 6) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 7) ปั๊มสุบจ่ายของเหลวแบบปริดท่อ ( Peristaltic pump )



รูปที่ 3.1 เครื่องสกัดแบบงานหมุน

### 3.2 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานการเตรียมโครงการ

รายละเอียด	ระยะเวลา ( เดือน-สัปดาห์ )															
	เม.ย 63				พ.ค. 63				มิ.ย 63				ก.ค 63			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	-----															
ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัด	-----															
ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม ANSYS Fluent	-----															
ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลและพลังงานของของไหลด้วยวิธี Finite volume	-----															

----- แผนการดำเนินงานโครงการ  
 \_\_\_\_\_ ดำเนินการเสร็จสิ้น



รูปที่ 3.2 เครื่องมือ-วิธีเบสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Jasco V-530



(ก) ผิวเรียบ



(ข) Roughness A



(ค) Roughness B

รูปที่ 3.3 ผิวงานหมุนที่ใช้ในการทดลอง (ก) งานหมุนแบบผิวเรียบ (ข) แบบ Roughness A และ (ค) แบบ Roughness B

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานการเตรียมโครงการ (ต่อ)

รายละเอียด	ระยะเวลา (เดือน-สัปดาห์)															
	เม.ย 63		ก.ย 63		ต.ค. 63		พ.ย 63									
	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4
วาด Geometry และวาด Mesh สำหรับการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent	(เม.ย. 63 – ม.ค.64)															
ทำการสอบเทียบแบบจำลองที่สร้างขึ้น	(ก.ย. 63 – ธ.ค. 63)															
ใช้แบบจำลองในการปรับปรุง และศึกษาผลของการปรับค่าพารามเตอร์	(พ.ย. 63 – ม.ค.64)															
วิจารณ์ และสรุปผลการทดลอง	(พ.ย. 63 – เม.ย.64)															
จัดทำรูปเล่ม	(มี.ค.64 – เม.ย.64)															

----- แผนการดำเนินงานโครงการ

\_\_\_\_\_ ดำเนินการเสร็จสิ้น

### 3.3 วิธีการทดลอง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการจำลองการผสมของ น้ำ และเฮปเทน ด้วยโปรแกรม ANSYS fluent เพื่อประกอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลร่วมกับผลการทดลองดังนั้นในหัวข้อนี้จึงสามารถแบ่งวิธีการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS fluent และการทดลองการสกัด โดยสามารถแสดงรายละเอียดในแต่ละส่วนได้ดังนี้

#### 3.3.1 การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS

1.) สร้างโครงสร้าง (geometry) และวาดเมช (mesh) เพื่อใช้ในการจำลองหารูปแบบการไหลในเครื่อง SDR

2.) เพื่อสร้างแบบจำลองการผสมในเครื่อง SDR จะต้องกำหนดเงื่อนไขในการจำลอง ได้แก่ ชนิดของสาร สภาวะในการจำลอง และสมการระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขสำหรับการจำลองการไหลภายในเครื่อง SDR

พารามิเตอร์	ตัวแปร
แบบจำลอง (model)	
- Multiphase model	VOF
- Viscous model	laminar
สารที่เกี่ยวข้องในระบบ	น้ำ อากาศ และเฮปเทน
ขอบเขต (boundary conditions)	
- อัตราการไหล (mL/s)	5 ถึง 15
- อัตราส่วนน้ำต่อเฮปเทน	1:1 3:1 และ 5:1
- ความเร็วรอบ (rpm)	200 ถึง 1500
- ความดันขาออก (pressure outlet)	ความดันบรรยากาศ
P-V coupling	SIMPLE
สมการโมเมนตัม (momentum equation)	QUICK
สมการเศษส่วนปริมาตร (volume fraction equation)	COMPRESSIVE



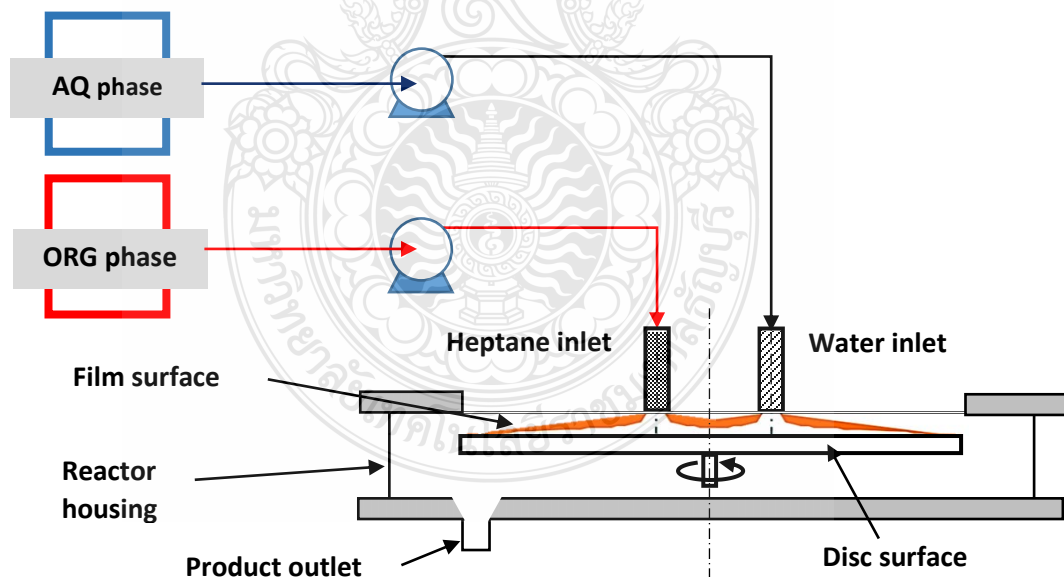
3.) ทำการสอบเทียบ (validation) โมเดลที่ใช้ในการจำลองกระบวนการโดยเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วของของเหลวบนเครื่อง SDR ที่คำนวณได้จากแบบจำลองนำมาเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากงานของ J.R. Burn [30] ซึ่งทำการทดลองในอุปกรณ์ชนิดเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบจะแสดงรายละเอียดในบทถัดไป

4.) ดำเนินการจำลองกระบวนการ และวิเคราะห์ผลการจำลอง ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในบทถัดไป

### 3.3.2 การทดลองการสกัด

1) ป้อนน้ำ และสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปแทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยมวล เข้าสู่เครื่อง SDR ทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และดำเนินการสกัดตามสภาวะที่ศึกษาในการทดลอง

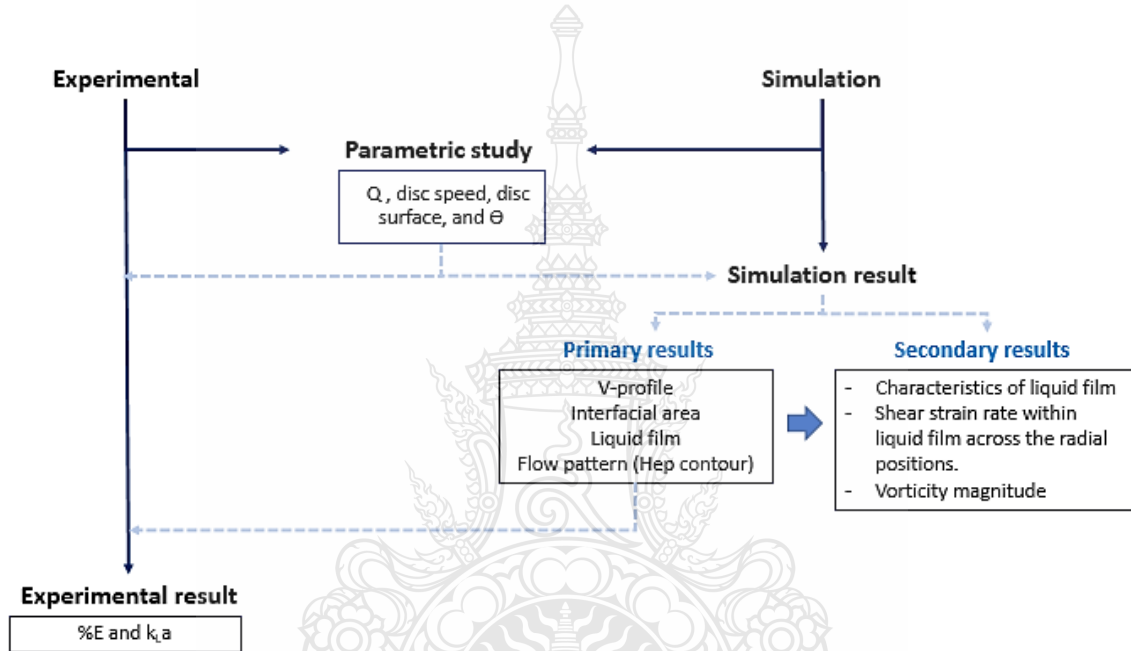
2) เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังจากดำเนินการเป็นเวลา 5 นาที แล้วใช้กรวยสกัดเพื่อแยกชั้นน้ำออกจากชั้นเฮปแทน



รูปที่ 3.4 การดำเนินการทดลองการสกัดในเครื่อง SDR

3) นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งเฟสน้ำ และเฟสเฮปแทนไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดเบนโซอิกด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer, Jasco V-530 และการไตเตรทด้วยเครื่อง titrator โดยในการวิเคราะห์หาปริมาณกรดเบนโซอิกในเฮปแทน และน้ำจะใช้ความยาวคลื่น 275 nm และ 269 nm ตามลำดับ

### 3.3.3 แผนผังการศึกษา



รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลอง และการจำลองกระบวนการในการศึกษาครั้งนี้

เพื่อให้เข้าใจขั้นตอนการดำเนินการ และความเชื่อมโยงระหว่างผลการทดลอง และการจำลองกระบวนการ สามารถแสดงรายละเอียดแผนผังการดำเนินการได้ในรูปที่ 3.4 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการผสมทั้งหมด จะถูกใช้สำหรับอธิบายผลของการปรับปรุงประสิทธิภาพการสกัดที่สภาวะต่าง ๆ ตามขอบเขตที่ใช้ในการทดลอง

## บทที่ 4

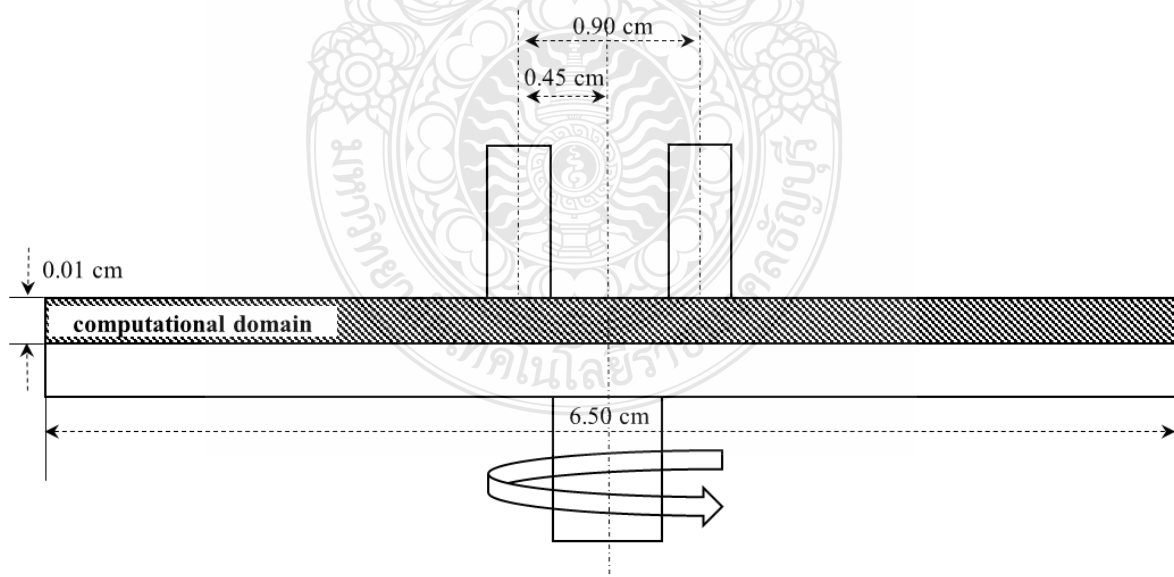
### ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากแผนผังในรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าการศึกษาคั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การทดลอง การสกัด และการจำลองกระบวนการผสม โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการทั้งสองส่วนจะถูกวิเคราะห์และอภิปรายในบทนี้

#### 4.1 แบบจำลองการคำนวณ (computational model)

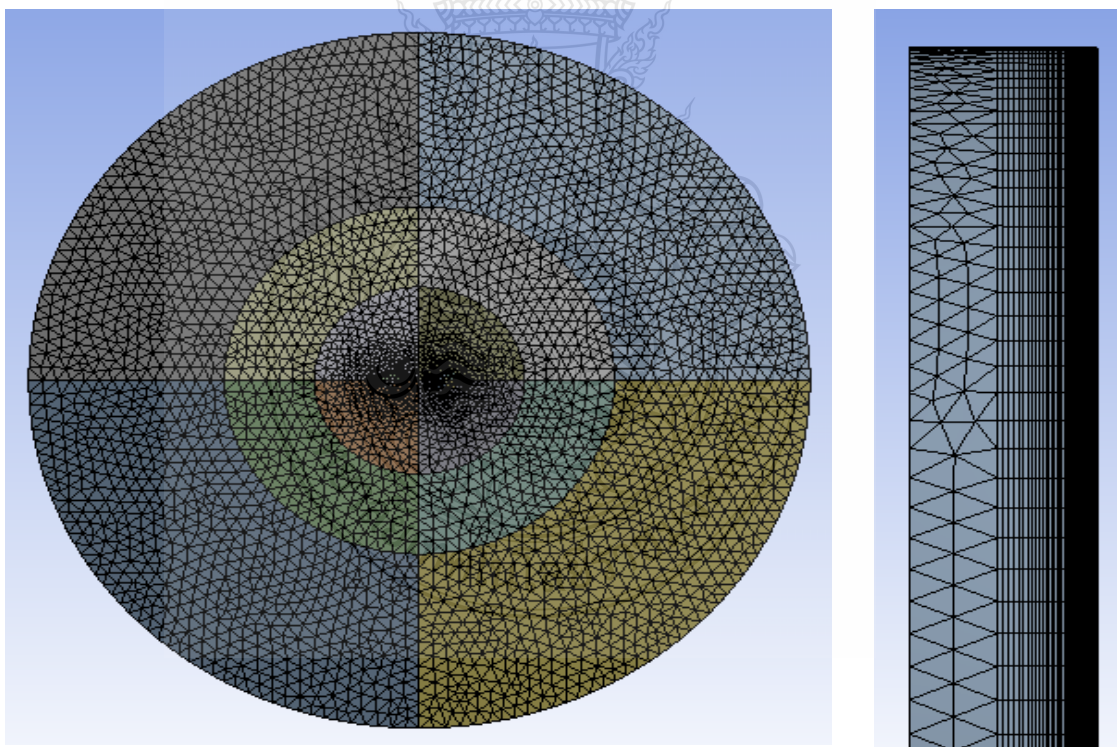
##### 4.1.1 โครงสร้าง และสภาวะขอบเขต (model geometry and boundary conditions)

องค์ประกอบเครื่อง SDR ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการสามารถแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วย ท่อป้อนของสารทั้งสองชนิด คือ น้ำ และเฮปแทน ซึ่งติดตั้งทางด้านบนของเครื่อง SDR ท่อของสารทั้งสองชนิดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันคือ 3 มิลลิเมตร ขนาดของจานหมุนในระบบ คือ 6.5 cm และมีระยะห่างระหว่างท่อป้อนสารถึงผิวของจานหมุนเท่ากับ 1 เซนติเมตร

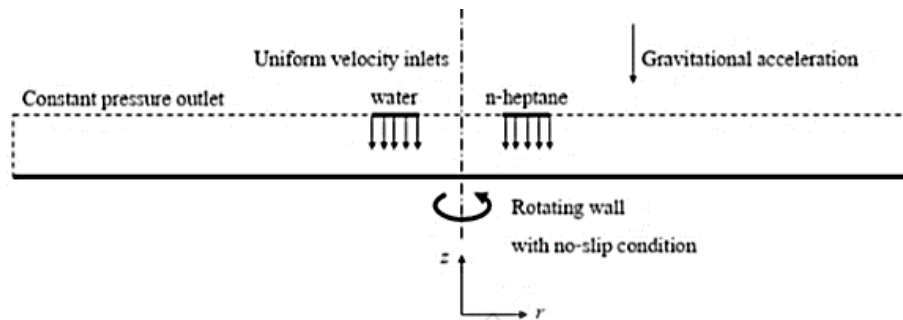


รูปที่ 4.1 โครงสร้างของเครื่อง SDR ที่ถูกใช้ในการจำลองกระบวนการผสม

การตีเมชแบบ unstructured (unstructured mesh) ถูกใช้สำหรับการศึกษาค้างนี้ โดยมี การไล่ระดับเมช (Inflation) บริเวณผิวของจานหมุนเพื่อช่วยให้การคำนวณการไหลของสารผสมบนจานหมุน มีความแม่นยำมากขึ้นโดยจำนวนเมชที่ใช้ในการจำลองในครั้งนี้ คือ 469,555 cells ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ใน ส่วนถัดมาจะเป็นการใส่ขอบเขตของกระบวนการผสม โดยแบบจำลองนี้เป็นแบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วย ของไหลสามวัฏภาคภายในระบบ คือ อากาศ น้ำ และเซปแทน ความเร็วในการไหลเข้าของสารทั้งสองชนิดถูก ป้อนค่าตามอัตราการไหลที่ใช้ในการศึกษา และส่วนสุดท้ายคือการใส่ขอบเขตของจานหมุนซึ่งตั้งค่าเป็น no-slip condition ปรับความเร็วการหมุนตามขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา รวมถึงพื้นผิวของจานหมุนจะมีการตั้ง ค่าทั้งแบบผิวเรียบ (smooth disc surface) และแบบผิวหยาบ (36 and 24-grit sandpaper) สามารถตั้ง ค่าได้โดยใส่ค่าความหยาบ (roughness height) ของพื้นผิวด้วยข้อมูลอ้างอิงจากงานของ Leroux [31] สามารถแสดงรายละเอียดการตั้งค่าขอบเขตได้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การตีเมชสำหรับใช้ในแบบจำลองกระบวนการผสม



รูปที่ 4.3 การตั้งค่าขอบเขตของแบบจำลองกระบวนการผสม

จากการตั้งค่าขอบเขตของแบบจำลองกระบวนการผสมสามารถสรุปสมมติฐานในการคำนวณได้ดังนี้

- 1). การจำลองกระบวนการพิจาณาที่การถ่ายโอนโมเมนตัมโดยปราศจากการถ่ายโอนมวล
- 2). น้ำ และเฮปเทนถูกป้อนเข้าระบบด้วยความเร็วในการไหลคงที่ (uniform velocity inlets)
- 3). ความเร็วของของไหลบริเวณใกล้ผิวจานหมุนมีค่าเป็นศูนย์ (no slip condition)
- 4). แบบจำลองความหนืดมีการเลือกใช้ตามค่า  $Re_{combine}$  ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.2

#### 4.2 การสอบเทียบแบบจำลองกระบวนการผสม (validation)

เพื่อความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของผลการจำลองกระบวนการผสม ดังนั้นในการสอบเทียบแบบจำลองของงานวิจัยนี้จึงสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การสอบเทียบการเลือกแบบจำลองความหนืด (viscous model) และการตั้งค่าตัวแปรของกระบวนการที่แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองหลายวัฏภาค (multiphase model) ขอบเขตของการจำลองกระบวนการ และสมการการดิสครีไทซ์เซชัน (discretization equation)

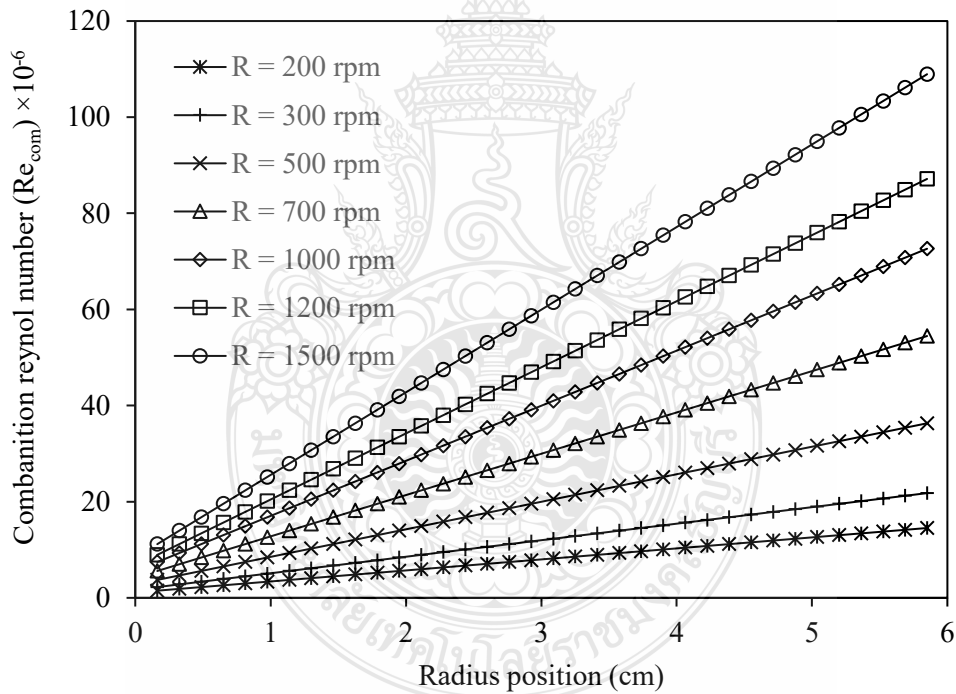
ในการเลือกแบบจำลองความหนืดสำหรับการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนสามารถเลือกได้จากเลขเรย์โนลด์ผสม (combination Reynold number;  $Re_{com}$ ) [32] ซึ่งการรวมผลของเลขเรย์โนลด์การหมุน (rotational Reynold number;  $Re_{rot}$ ) และเลขเรย์โนลด์ของชั้นฟิล์ม (film Reynold number;  $Re_{film}$ ) โดยที่ค่า  $Re_{com}$  น้อยกว่า  $1 \times 10^5$  รูปแบบการไหลของสารผสมบนเครื่อง SDR จะเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) และรูปแบบการไหลในเครื่อง SDR จะเปลี่ยนเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent flow) เมื่อค่า  $Re_{com}$  มีค่ามากกว่า  $1 \times 10^6$  โดยสามารถแสดงขอบเขตของค่า  $Re_{com}$  และความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re_{film}$  และ  $Re_{rot}$  ต่อ  $Re_{com}$  ดังแสดงในรายละเอียดด้านล่างนี้

$$Re_{rot} = \frac{Rr_i^2}{\nu} \quad (4.1)$$

$$Re_{film} = \frac{Q}{2\pi r_d \nu} \quad (4.2)$$

$$Re_{com} = Re_{rot} Re_{film} \quad (4.3)$$

- เมื่อ R คือ ความเร็วการหมุน (rpm)  
 $r_i$  คือ ระยะตามตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีของจานหมุน (m)  
 $r_d$  คือ ขนาดรัศมีของจานหมุน (m)  
 Q คือ อัตราการไหลของสารผสม (ml/s)  
 $\nu$  คือ ความหนืดไดนามิกของสารผสม (Pa.s)

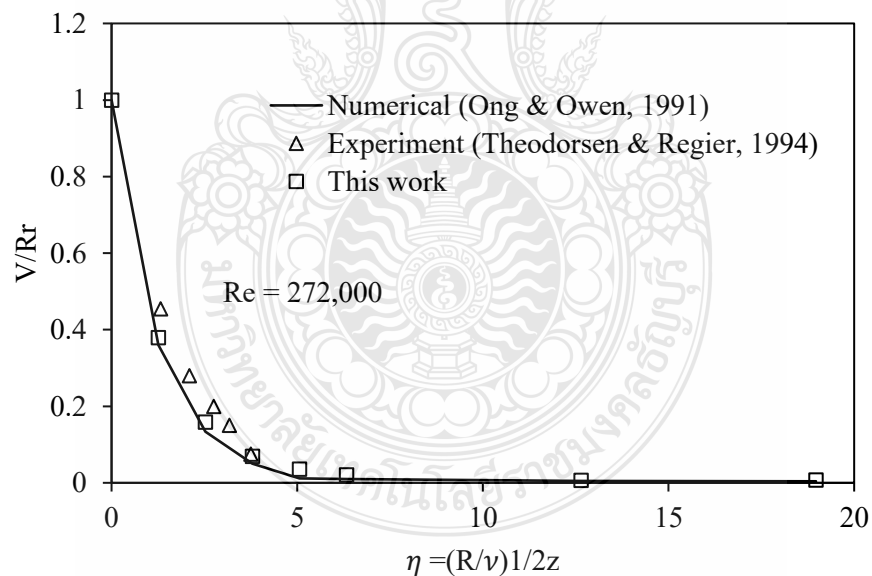


รูปที่ 4.4 ขอบเขตของรูปแบบการไหลในเครื่อง SDR ที่อัตราการไหล 5 ml/s และความเร็วการหมุนค่าต่าง ๆ

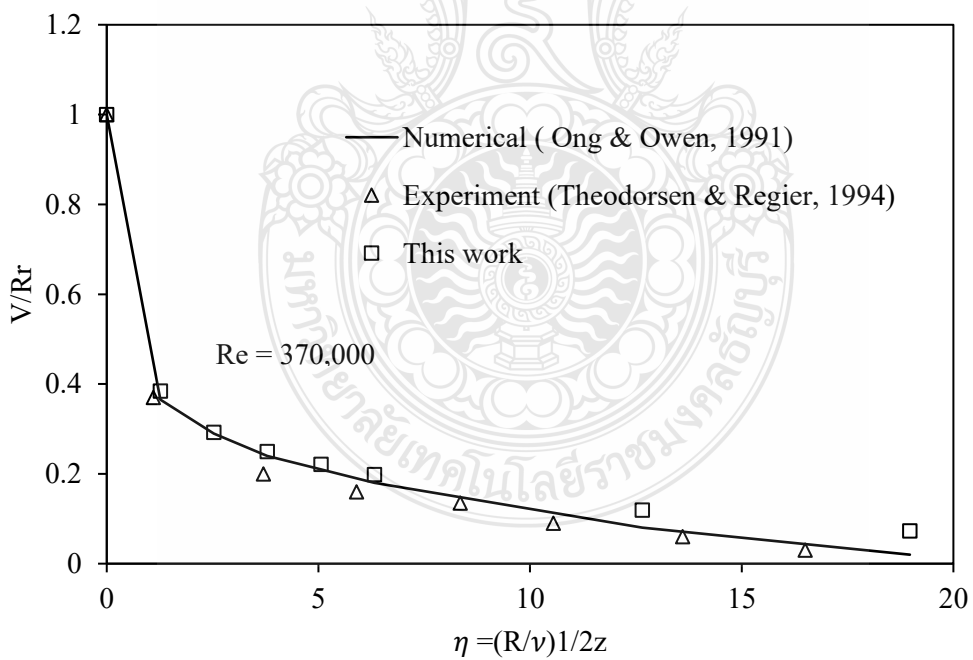
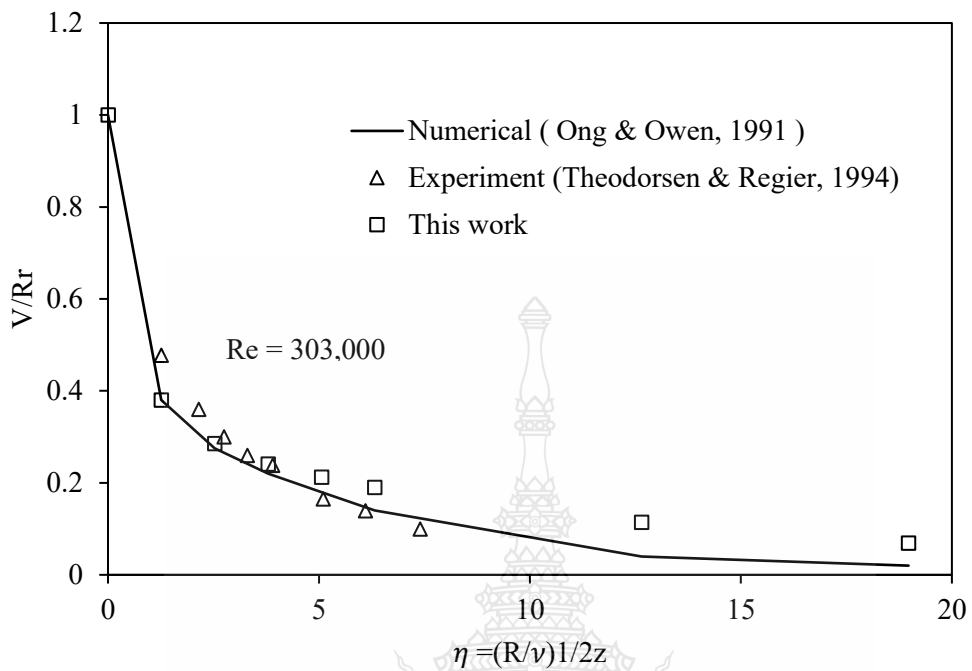
จากกราฟรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาที่การเพิ่มขึ้นของค่า Q ต่อเลข  $Re_{com}$  ที่ค่า R ค่าต่างๆ พบว่ามีค่า  $Re_{com}$  ต่างกันเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลของการเพิ่มขึ้นของค่า Q และการเพิ่มขึ้นของ

ค่า  $R$  พบว่าค่า  $R$  จะมีผลต่อค่า  $Re_{com}$  มากกว่า ดังนั้นในการเลือกแบบจำลองความหนืดจึงใช้ค่า  $R$  เป็นเกณฑ์ โดยที่ค่า  $R$  น้อยกว่า 500 rpm ค่า  $Re_{com}$  ตลอดช่วงแนวแกนรัศมีส่วนใหญ่อยู่ในช่วง ราบเรียบ และ ทรานซีชั่น ดังนั้นในการจำลองกระบวนการสำหรับค่า  $R$  ในช่วงนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองความหนืดแบบราบเรียบ และถ้าค่า  $R$  มีค่ามากกว่า 500 rpm ค่า  $Re_{com}$  ตลอดช่วงแนวแกนรัศมีส่วนใหญ่อยู่ในช่วง ทรานซีชั่น และปั่นป่วน ดังนั้นในการจำลองกระบวนการจึงเลือกใช้แบบจำลองความหนืดแบบปั่นป่วน

หลังจากทำการเลือกแบบจำลองความหนืด (viscouse model) สำหรับค่า  $R$  ค่าต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการเลือกใช้แบบจำลองความหนืด โดยทำการเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วเชิงเส้น (tangential velocity) ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจากงานวิจัยของ Ong และคณะ [33] และการจำลองกระบวนการ โดยทำการทดสอบที่ค่า  $Re_{rot}$  เท่ากับ 272,000 303,000 และ 370,000 ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ ทรานซีชั่น และปั่นป่วน ตามลำดับ ในการจำลองกระบวนการของไหลที่ใช้ในการทดสอบเป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $1000 \text{ kg/m}^3$  และความหนืดจลน์ เท่ากับ  $0.001 \text{ kg/m-s}$  ค่า  $R$  ของงานหมุนเท่ากับ  $40 \text{ rad/s}$  โดยความดันในระบบมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงในกราฟรูปที่ 4.5



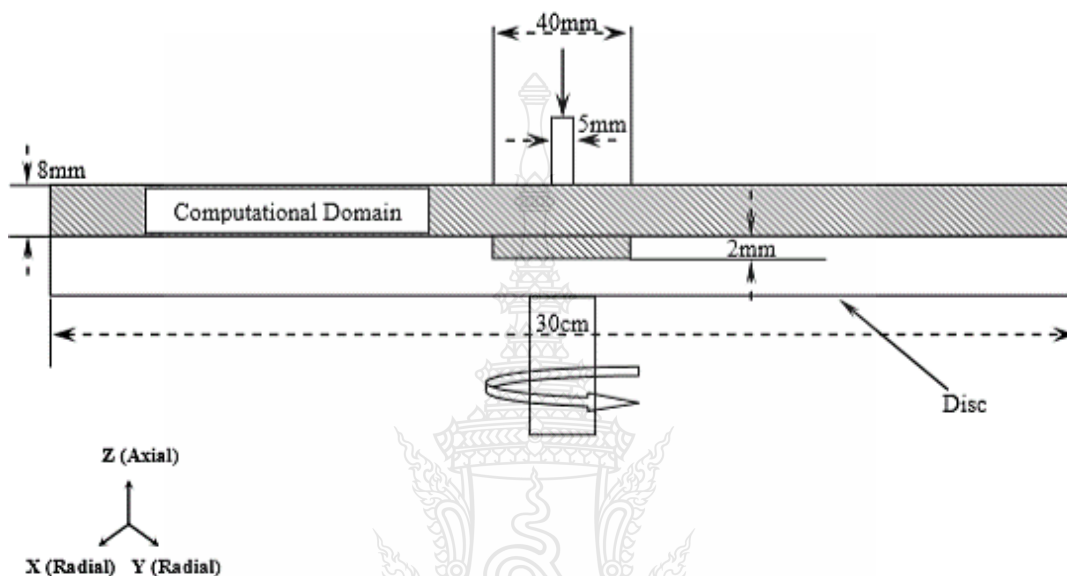
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วเชิงเส้น (tangential velocity) ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจากงานวิจัยของ Ong และคณะ [31] และจากการจำลองกระบวนการ



รูปที่ 4.5(ต่อ) การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วเชิงเส้น (tangential velocity) ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจากงานวิจัยของ Ong และคณะ [33] และจากการจำลองกระบวนการ

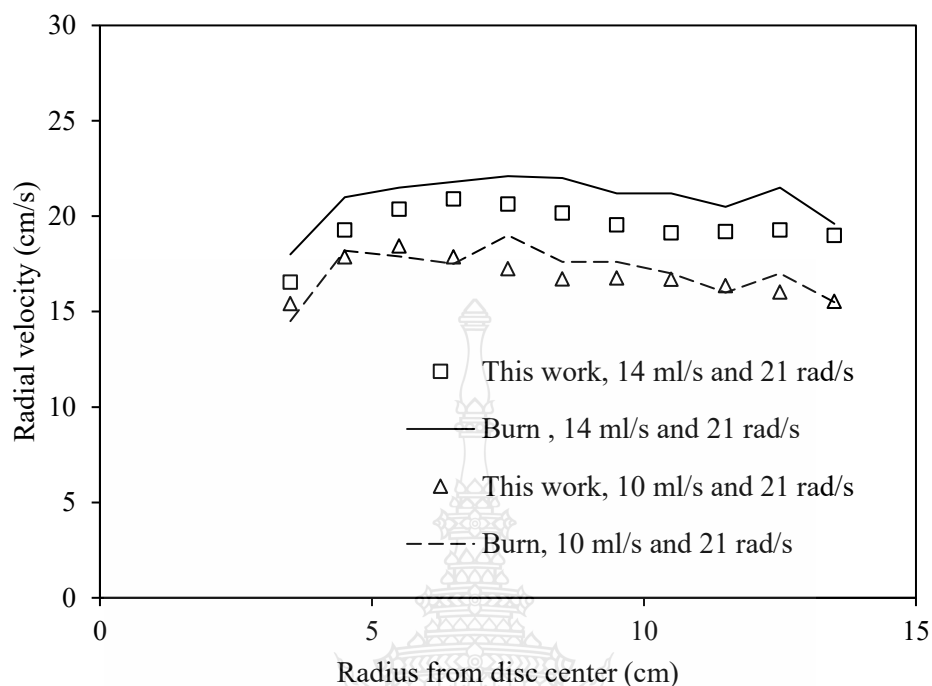


ในส่วนถัดมาเป็นการสอบเทียบการตั้งค่าตัวแปรของกระบวนการที่แสดงในตารางที่ 3.2 โดยทำการเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วในแนวรัศมีของของไหลที่ชั้นฟิล์มของไหลบนเครื่อง SDR กับผลการทดลองจากงานวิจัยของ J.R. Burn [30] โครงสร้างของเครื่อง SDR ที่ใช้ในการสอบเทียบแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของแบบจำลองตามงานวิจัยของ J.R. Burn

จากรูปที่ 4.6 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจานหมุน คือ 30 cm และมีการทำร่องทรงกระบอกตรงกลางของจานหมุนขนาด 4 cm ที่ความลึก 0.2 cm ของเหลวที่ใช้ในการศึกษา คือ น้ำ ซึ่งจะถูกป้อนทางด้านบนของเครื่อง SDR การตีเมซของแบบจำลองใช้เป็นแบบ unstructured ขนาด 0.003 m โดยมีการทำ inflation บริเวณผิวของจานหมุนเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองกระบวนการ จำนวนเมซทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 293,919 cells ผลการทดลองที่ได้แสดงในกราฟรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วการไหลบนจานหมุน

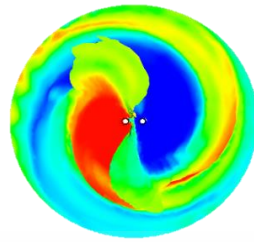
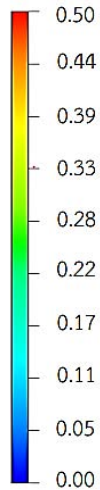
### 4.3 ผลการจำลองกระบวนการผสม

หลังจากทำการสอบเทียบแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองกระบวนการแล้วในส่วนถัดไปจะเป็นการแสดงผลการจำลองกระบวนการผสมระหว่าง น้ำ และเฮปเทน โดยศึกษาผลของการปรับความเร็วการหมุน (R) และอัตราการไหล (Q) ต่อรูปแบบการผสมของสารเฮปเทน (heptane phase contour) ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว (liquid film thickness) พื้นที่ผิวสัมผัส (interfacial area) อัตราเฉือนภายในชั้นฟิล์ม (shear strain rate) และระยะเวลาคงอยู่ (residence time) ตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำไปใช้อธิบายถึงผลการทดลองของระบบสกัด น้ำ – เบนโซอิก/เฮปเทน ในหัวข้อถัดไป

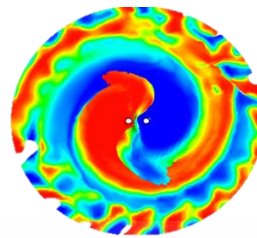
#### 4.3.1 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลต่อรูปแบบการไหลของเฮปเทน

จากรูปที่ 4.8 (ก) แสดงผลของการปรับความเร็วการหมุนตั้งแต่ 200 ถึง 1500 rpm ที่อัตราการไหล 5 ml/s เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มค่า R พบว่าความยาว และรอบของเกลียวหมุนจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ที่ถูกปรับปรุงจากผลการเพิ่มค่า R ส่งผลให้น้ำ และเฮปเทน ภายในระบบมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น

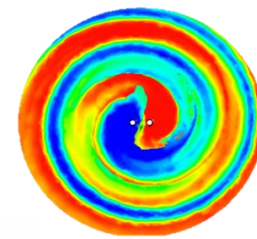
Heptane volume fraction



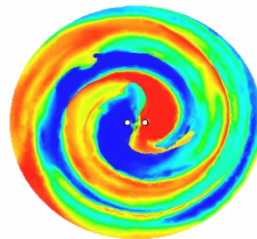
200 rpm



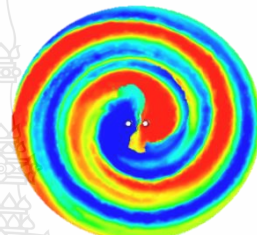
500 rpm



1000 rpm



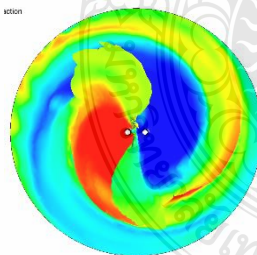
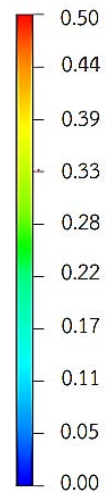
1200 rpm



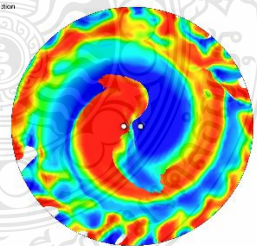
1500 rpm

(ก)  $Q = 5 \text{ ml/s}$

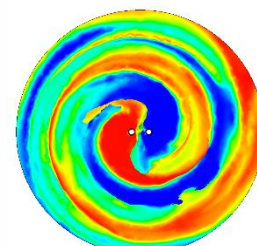
Heptane volume fraction



200 rpm



500 rpm

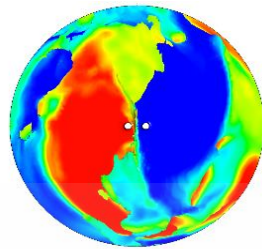
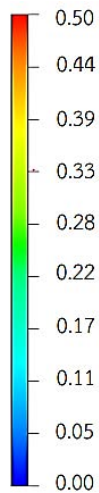


1000 rpm

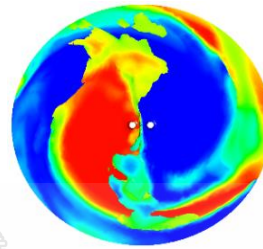
(ข)  $Q = 10 \text{ ml/s}$

รูปที่ 4.8 ผลการปรับค่า R ต่อรูปแบบการไหลของเฮปเทนที่  $Q$  เท่ากับ (ก)  $5 \text{ ml/s}$  และ (ข)  $10 \text{ ml/s}$

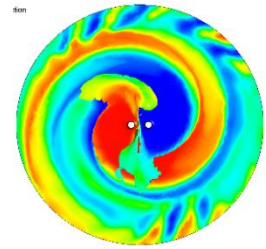
Heptane volume fraction



200 rpm



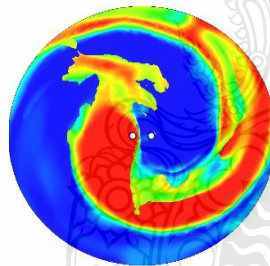
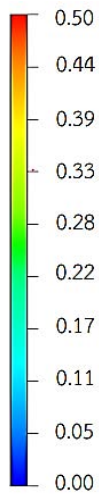
500 rpm



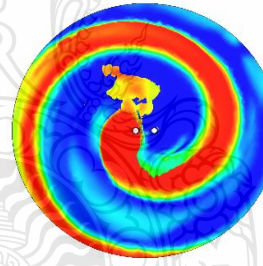
1500 rpm

(ก) งานหมุนแบบผิวเรียบ

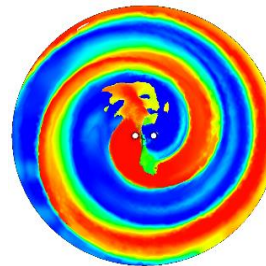
Heptane volume fraction



200 rpm



500 rpm



1000 rpm

(ข) งานหมุนแบบหยาบ A

รูปที่ 4.9 รูปแบบการไหลของเฮปเทนที่  $Q$  เท่ากับ  $5 \text{ ml/s}$  โดยเปรียบเทียบระหว่าง (ก) งานหมุนแบบผิวเรียบ และ (ข) งานหมุนแบบหยาบ A

เมื่อพิจารณาผลของการปรับอัตราการไหลต่อรูปแบบการไหลของเฮปเทนบนชั้นฟิล์มของเหลวที่ความเร็วการหมุน 200 500 และ 1500 rpm ในรูปที่ 4.8 (ข) จากผลการศึกษพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก  $5 \text{ ml/s}$  เป็น  $10 \text{ ml/s}$  เกลียวของสารเฮปเทนมีจำนวนรอบที่น้อยลง และมีความหนาของ

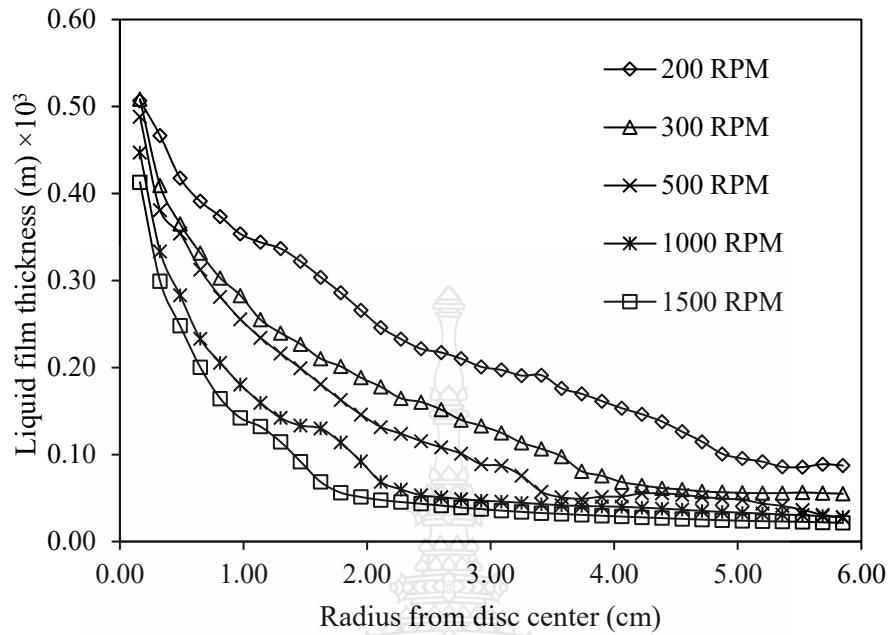
เกลียวหมุนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉื่อย (inertial force) ในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้นสามารถสังเกตได้จาก การเพิ่มขึ้นของเลข  $Re_{film}$  ดังแสดงในสมการที่ 4.2 [34] สามารถสังเกตได้ว่าเลข  $Re_{film}$  จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า  $Q$  ดังนั้นจำนวนรอบ และความหนาของเกลียวหมุนจะมีค่าลดลงเมื่อค่า  $Q$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบรูปแบบการผสมระหว่างผิวงานหมุนแบบผิวเรียบ และแบบผิวหยาบ A ดำเนินการที่ความเร็วการหมุน 200 500 และ 1000 rpm และอัตราการไหล 5 ml/s จากผลการศึกษาพบว่า การกระจายตัว และความหนาของเกลียวหมุนของเฮปแทน มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยที่งานหมุนแบบผิวเรียบจะมีความหนาของเกลียวหมุน และมีการผสมระหว่างสารสองวัฏภาคดีกว่าเล็กน้อย ดังนั้นการพิจารณาเพียงรูปแบบการไหลของสารเฮปแทนในเครื่อง SDR ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการดำเนินการโดยใช้งานหมุนแบบผิวหยาบจะเพิ่มประสิทธิภาพการผสมแก่เครื่อง SDR ได้ซึ่งจะต้องทำการศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อถัดไป

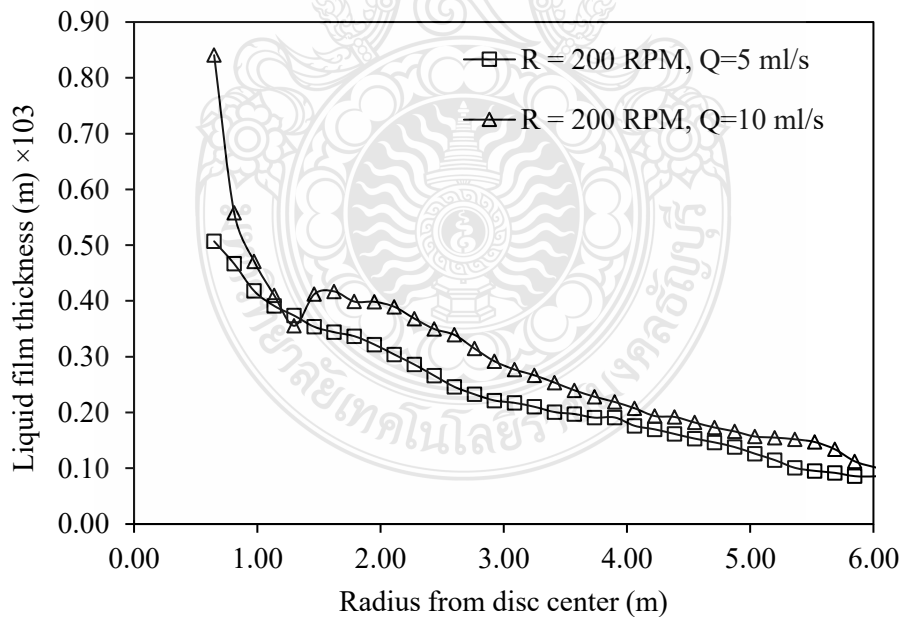
#### 4.3.2 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว

รูปที่ 4.10 แสดงผลของความเร็วจานหมุน ( $R$ ) ต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวบนงานหมุนที่อัตราการไหล ( $Q$ ) เท่ากับ 5 ml/s เมื่อพิจารณาที่ความเร็วการหมุนคงที่ จากผลการจำลองพบว่า ลักษณะความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวบนงานหมุนมีแนวโน้มที่ลดลงจากจุดศูนย์กลางจนถึงขอบของงานหมุน เมื่อพิจารณาผลของความเร็วจานหมุนที่เพิ่มขึ้นพบว่าลักษณะความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวมีแนวโน้มที่ลดลง ผลลัพธ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยผลของการปรับปรุงแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ซึ่งเป็น ผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการหมุน ที่มีอิทธิพลเหนือกว่าเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย (inertial force) และความหนืดของสารผสม (viscous force) [35]

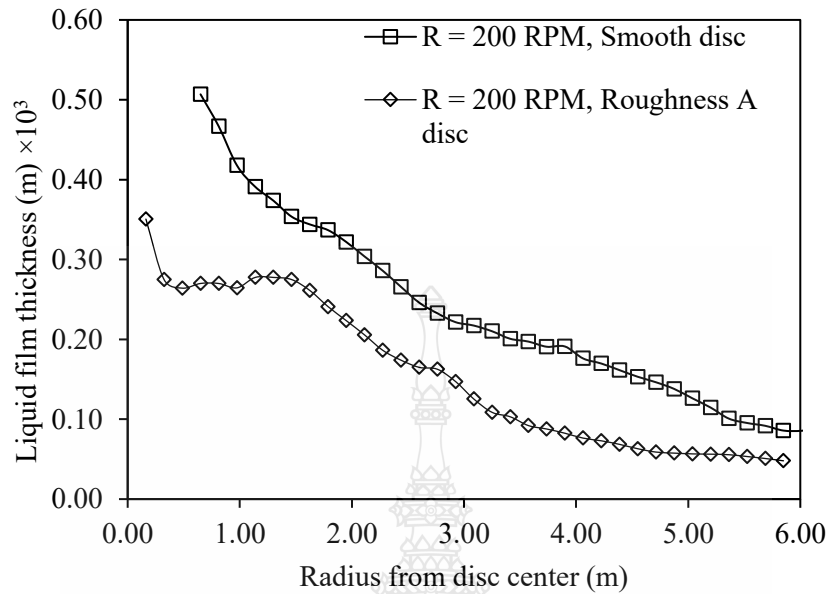
รูปที่ 4.11 แสดงผลของการปรับอัตราการไหล ( $Q$ ) ต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวโดยเทียบที่ค่าความเร็วการหมุน ( $R$ ) เท่ากับ 200 rpm พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 5 ml/s เป็น 15 ml/s แนวโน้มของค่าความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวบนงานหมุนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากแรงเฉื่อย (inertial force) ที่เพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มอัตราการไหลซึ่งสามารถสังเกตได้จากสมการคำนวณเลข  $Re_{film}$  ดังแสดงในสมการที่ 4.2



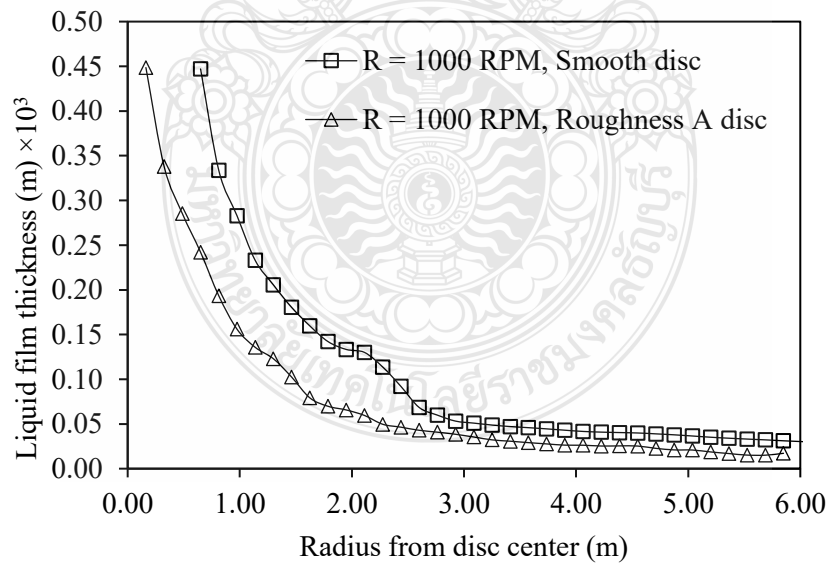
รูปที่ 4.10 ผลการปรับความเร็วการหมุน (R) ต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวบนจานหมุนที่อัตราการไหล 5 ml/s



รูปที่ 4.11 ผลการปรับอัตราการไหล (Q) ต่อความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวบนจานหมุนที่ผลการปรับความเร็วการหมุน (R) 200 rpm



รูปที่ 4.12 ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวที่ Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R เท่ากับ 200 rpm โดยเปรียบเทียบระหว่างจานหมุนแบบผิวเรียบ และจานหมุนแบบผิวหยาบ A



รูปที่ 4.13 ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวที่ Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R เท่ากับ 1000 rpm โดยเปรียบเทียบระหว่างจานหมุนแบบผิวเรียบ และจานหมุนแบบผิวหยาบ A

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงผลของการเปรียบเทียบความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว ระหว่างผิวจานหมุนแบบผิวเรียบ และแบบผิวหยาบ A ที่สภาวะค่า Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า R เท่ากับ 200 และ 1000 rpm ตามลำดับ จากผลการจำลองที่สภาวะค่า R เท่ากับ 200 rpm พบว่าการดำเนินการโดยใช้จานหมุนแบบผิวหยาบ A จะให้ค่าความสูงของชั้นฟิล์มที่ต่ำกว่าการดำเนินการโดยใช้ผิวจานหมุนแบบผิวเรียบ และเมื่อเพิ่มค่า R ให้สูงขึ้นพบว่าความต่างของค่าความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวจะมีค่าลดน้อยลง โดยที่ค่า R เท่ากับ 1000 rpm ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวของจานหมุนแบบผิวเรียบมีค่าสูงกว่าผลลัพธ์ของจานหมุนแบบผิวหยาบ A เล็กน้อยเท่านั้น โดยเหตุที่ค่าความสูงชั้นฟิล์มของเหลวของจานหมุนแบบผิวหยาบ A มีค่าต่ำกว่าเป็นผลมาจากการปรับปรุงความสามารถในการผสม และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ที่เพิ่มขึ้นทำให้สารผสมในระบบมีความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลของการปรับปรุงนี้จะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 4.3.4 และ 4.3.5

#### 4.3.3 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารผสม

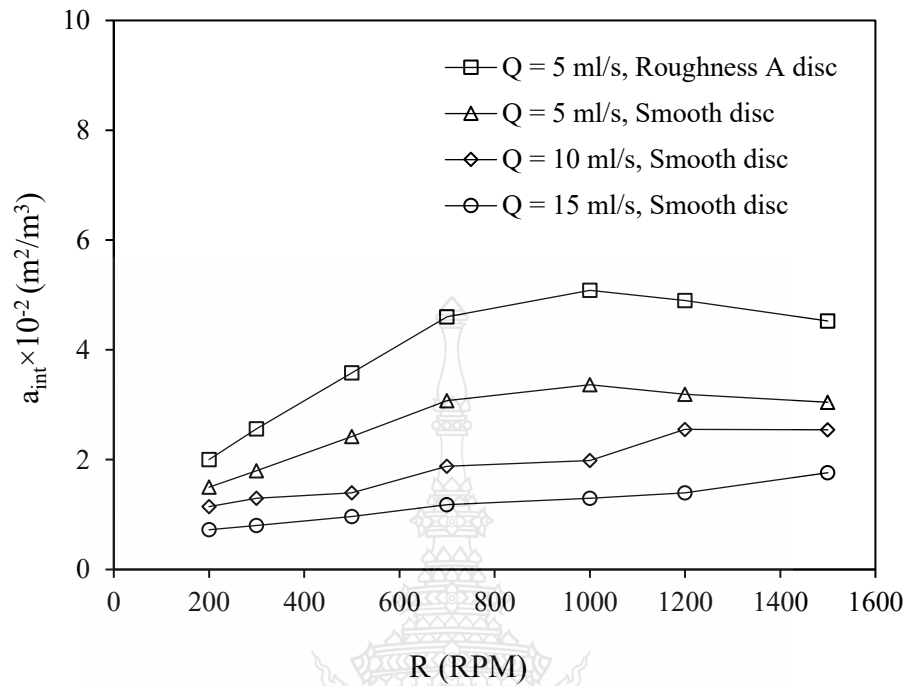
รูปที่ 4.14 แสดงผลของการปรับความเร็วในการหมุน (R) ต่อพื้นที่ผิวสัมผัส ( $a_{int}$ ) ระหว่างสารผสมที่อัตราการไหล 5 ถึง 15 ml/s เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มความเร็วในการหมุนที่อัตราการไหลคงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเร็วในการหมุน ค่า  $a_{int}$  มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) [36] ทำให้เกลียวหมุนของเฮปแทนมีจำนวนรอบมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) ต่อมาเมื่อพิจารณาการเพิ่มค่าอัตราการไหล (Q) จาก 5 เป็น 15 ml/s พบว่าแนวโน้มของค่า  $a_{int}$  มีแนวโน้มที่ลดน้อยลงซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรของของเหลวในระบบที่เพิ่มขึ้นในขณะที่การกระจายตัวของเฮปแทนในระบบมีค่าลดน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของผิวสัมผัสของจานหมุน จากผลการจำลองพบว่าค่า  $a_{int}$  ของจานหมุนแบบผิวขรุขระมีเส้นแนวโน้มที่สูงกว่าค่าของจานหมุนแบบผิวเรียบเป็นผลมาจากปริมาตรของสารผสมบนจานหมุนแบบผิวขรุขระมีปริมาณที่น้อยกว่าแบบผิวเรียบ ในขณะที่การกระจายตัวของเฮปแทนในเครื่อง SDR เมื่อเทียบผลลัพธ์ระหว่างผิวจานหมุนแบบผิวเรียบ และผิวหยาบ A มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.9

#### 4.3.4 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลต่อเวลาคงอยู่ของสารผสม

เวลาคงอยู่ของสารผสม (residence time;  $t_m$ ) เป็นหนึ่งในตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการดำเนินการด้วยเครื่อง SDR ซึ่งสามารถหาค่า  $t_m$  ได้จากสมการที่ 4.4 นี้

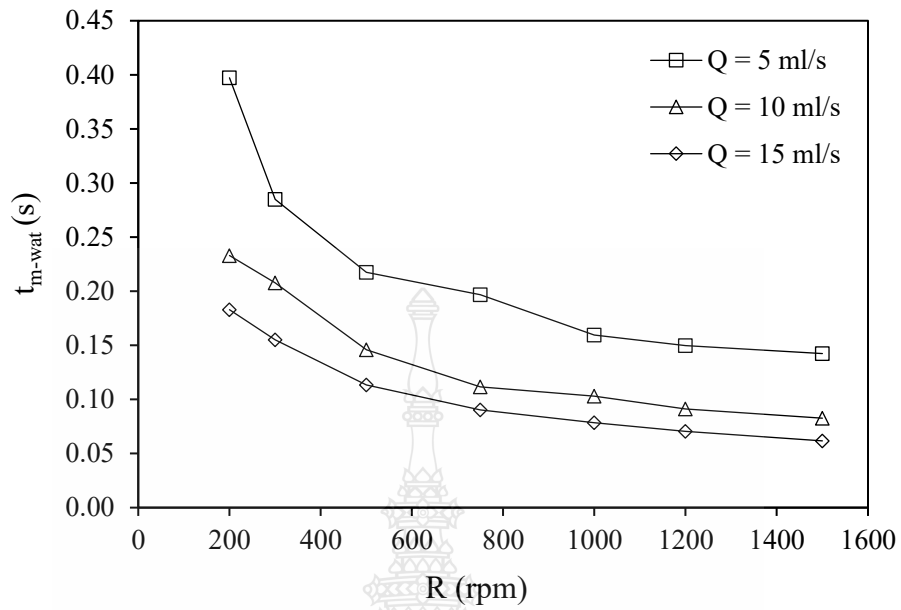
$$t_m = \left( \frac{\text{volume occupied in the system}}{\text{inlet volumetric flow rate}} \right) \quad (4.4)$$



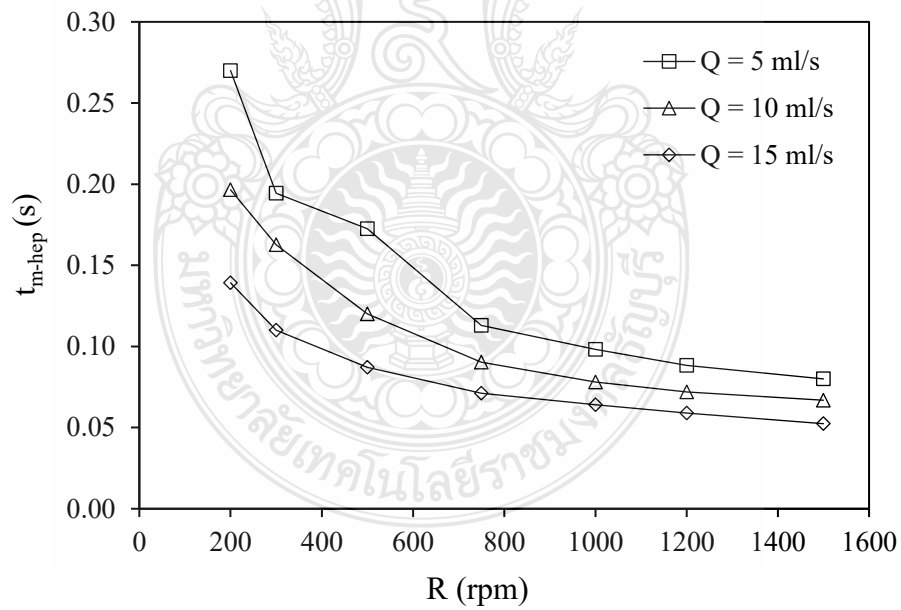


รูปที่ 4.14 ผลการปรับอัตราการไหล (Q) และความเร็วการหมุนต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของสารผสม

จากผลการศึกษาผลของความเร็วในการหมุน (R) และอัตราการไหล (Q) ต่อค่าเวลาคงอยู่ของน้ำ ( $t_{m-wat}$ ) และเฮปแทน ( $t_{m-hep}$ ) เมื่อพิจารณาว่าการเพิ่มความเร็วในการหมุนพบว่าค่า  $t_m$  ของสารผสมทั้งสองวัฏภาคมีค่าลดลงดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.15 และ 4.16 โดยที่การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบจาก 200 rpm เป็น 1500 rpm ค่า  $t_{m-wat}$  และ  $t_{m-hep}$  มีค่าลดลงจาก 0.397 s เป็น 0.142 s และ 0.270 s เป็น 0.080 s ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของค่า  $t_m$  นี้สามารถอธิบายได้ด้วยความสูงของชั้นฟิล์มที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุน ส่งผลให้ปริมาตรของสารผสมบนจานหมุนมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มอัตราการไหล (Q) ผลลัพธ์ที่ได้พบค่า  $t_m$  มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นโดยที่การเพิ่มอัตราการไหลจาก 5 ml/s เป็น 15 ml/s ที่ความเร็วการหมุน 200 ถึง 1500 rpm ค่า  $t_{m-hep}$  และ  $t_{m-wat}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.270 – 0.080 s เป็น 0.139 – 0.0524 s และ 0.397 – 0.142 s เป็น 0.183 – 0.0617 s ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายผลลัพธ์นี้ได้ด้วยสมการที่ 4.2



รูปที่ 4.15 ผลของความเร็วกการหมุน และอัตราการไหลต่อเวลาคงอยู่ของน้ำ ( $t_{m-wat}$ )



รูปที่ 4.16 ผลของความเร็วกการหมุน และอัตราการไหลต่อเวลาคงอยู่ของเฮปเทน ( $t_{m-hep}$ )

#### 4.3.5 ผลการปรับความเร็วรอบ และอัตราการไหลต่อโปรไฟล์ความเร็วของสารผสม

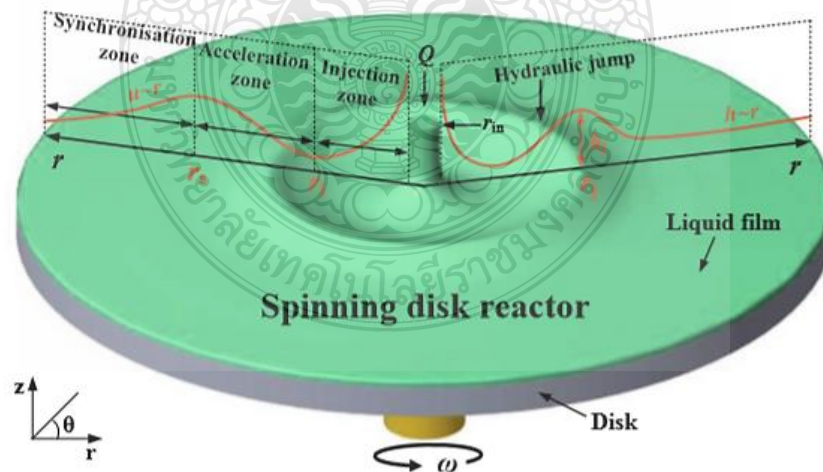
จากงานวิจัยของ Dongxiang [34] สามารถแบ่งโซนจากโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมได้ออกเป็น 3 โซนดังแสดงในรูปที่ 4.17 สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1. โซนการป้อน (injection zone) เป็นโซนที่สารผสมตกกระทบกับจานหมุนซึ่งจะเป็นโซนที่ได้รับผลกระทบจากแรงต้านของความหนืด (viscous drag) มากที่สุด

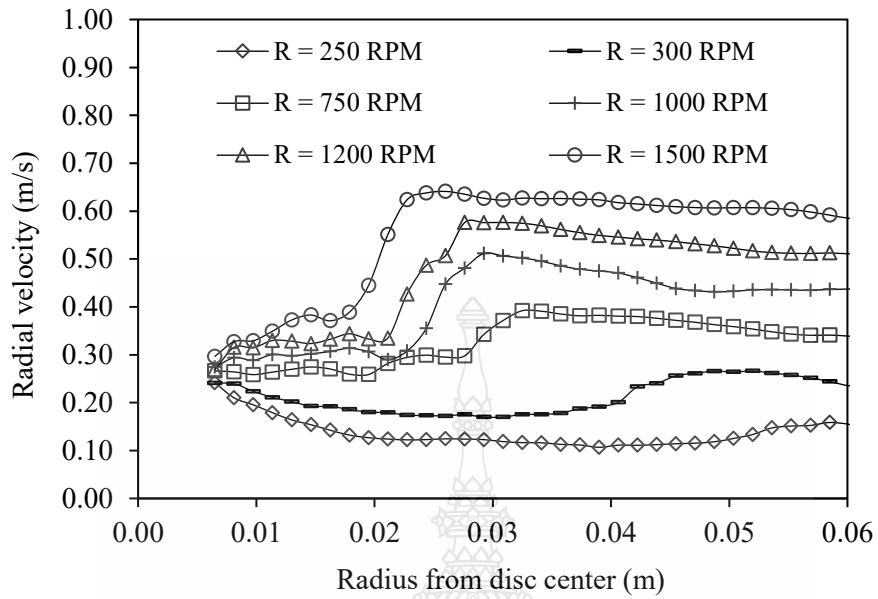
2. โซนการเร่ง (acceleration zone) เป็นโซนที่โปรไฟล์ความเร็วของสารผสมมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงเหวี่ยงตามแนวแกนรัศมี

3. โซน synchronized เป็นโซนความเร็วของสารผสมบนจานหมุนมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วในการหมุนมากที่สุด

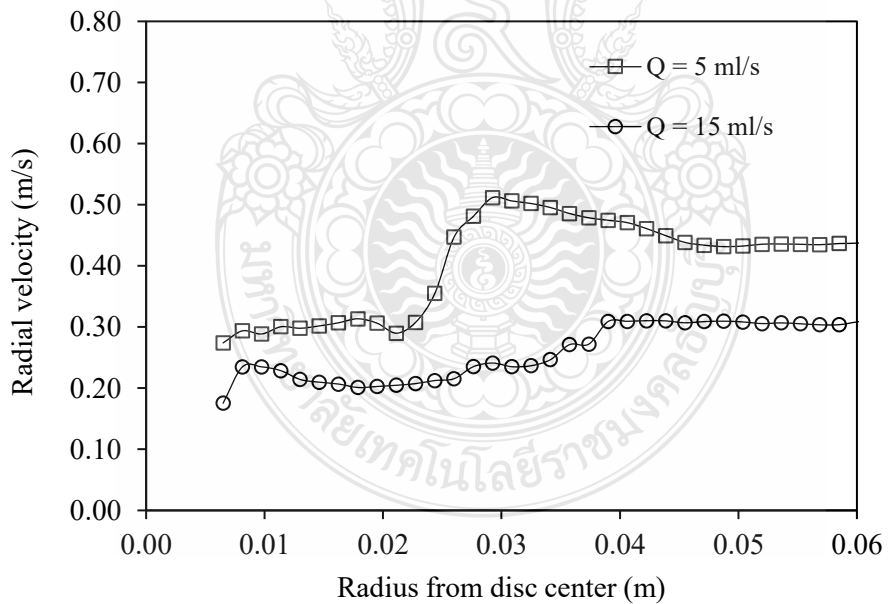
จากรูปที่ 4.17 จากโซนการผสมทั้ง 3 โซน สามารถแบ่งขนาดของแต่ละโซนได้จากลักษณะของโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมบนจานหมุน โดยที่จุดต่ำสุดของโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมนับจากจุดศูนย์กลางของจานหมุนเป็นจุดแบ่งของโซนการป้อน (injection zone) เรียกระยะนี้ว่า  $r_i$  (injection radius) และในส่วนของโซน synchronized แบ่งได้จากจุดที่มีความเร็วสูงที่สุดนับจากจุด  $r_i$  เรียกว่า  $r_s$  (synchronized radius) ซึ่งในโซน  $r_s$  นี้เป็นโซนมีผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) และอัตราเฉือน (shear rate) ภายภายในชั้นฟิล์มมากที่สุด ดังนั้นการดำเนินเครื่อง SDR ในสถานะที่ทำให้ค่า  $r_s$  มีความกว้างมากที่สุดจึงเป็นสถานะที่ทำมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลดีที่สุด



รูปที่ 4.17 แสดงโซนการผสมของของเหลวในเครื่อง SDR [32]



รูปที่ 4.18 แสดงผลของความเร็วการหมุน ต่อโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมบนจานหมุนที่อัตราการไหล 5 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.19 แสดงผลของอัตราการไหล ต่อโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมบนจานหมุน ที่ความเร็วการหมุน เท่ากับ 1000 rpm

รูปที่ 4.18 สามารถแสดงผลของการปรับความเร็วการหมุนต่อโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมบนจานหมุนที่อัตราการไหลเท่ากับ 5 ml/s จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มค่า R ความเร็วของสารผสมบนจานหมุนตลอดแนวแกนรัศมีจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งค่าความเร็วนี้จะแปรผกผันกับค่าความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้จากสมการการไหลต่อเนื่อง (continuity equation) และโมเดลของนัสเซลท์ (nusselt model) แสดงรายละเอียดในสมการที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

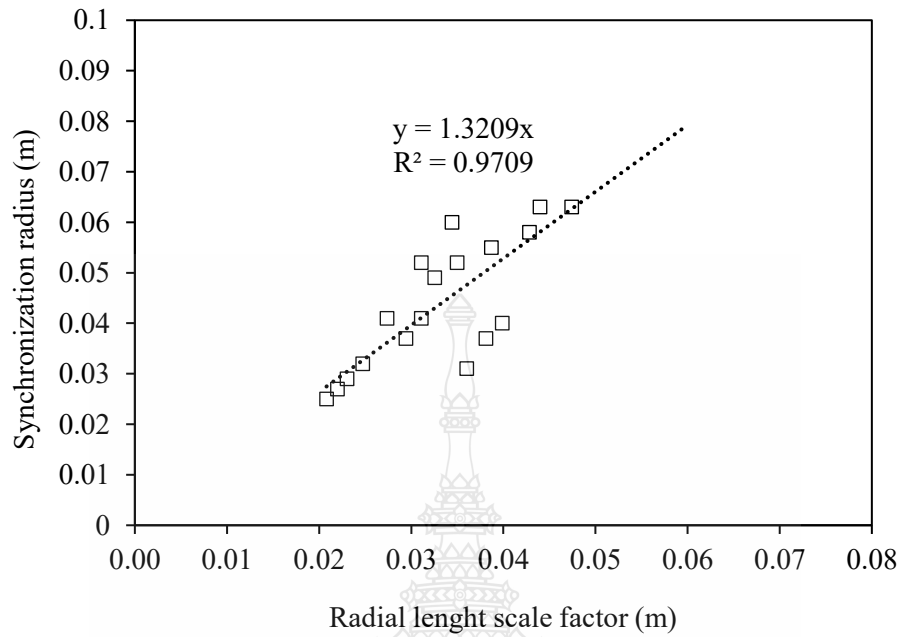
$$h = \left( \frac{Q}{2\pi r u} \right) \quad (4.5)$$

$$h_N = \left( \frac{3Qv}{2\pi r^2 \omega^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.6)$$

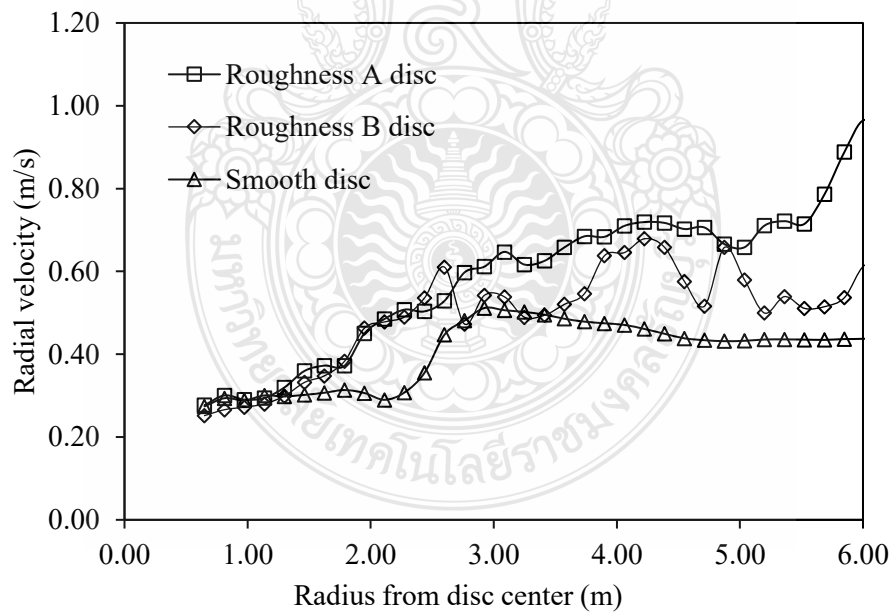
เมื่อพิจารณาระยะ  $r_s$  ที่ความเร็วรอบค่าต่าง ๆ พบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มมากขึ้น ระยะ  $r_s$  นับจากจุดศูนย์กลางของจานหมุนมีค่าลดลง หรือกล่าว คือ มีความกว้างของโซน synchronized เพิ่มมากขึ้น โดยที่การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการหมุนจาก 200 rpm เป็น 1500 rpm ระยะ  $r_s$  จะลดลงจาก 0.06 m เป็น 0.025 m ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ต่อมาเมื่อพิจารณาที่รูป 4.19 สามารถแสดงผลของการปรับอัตราการไหลต่อโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมบนจานหมุนที่ความเร็วการหมุนเท่ากับ 1000 rpm จากผลการศึกษาพบว่าระยะ  $r_s$  ของสารผสมบนจานหมุนมีค่าที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากแรงเฉื่อยที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองกระบวนการจากงานวิจัยของ Dongxiang wang และคณะ [34] ได้มีการอธิบายการเพิ่มขึ้นของโซน synchronized ว่าเป็นผลจากการปรับปรุงแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) สามารถอธิบายได้ชัดเจนขึ้นด้วยเลข Ekman (Ekman number;  $E_k$ ) ดังแสดงรายละเอียดในสมการที่ 4.7

จากงานวิจัยของ J.R. Burns [30] ได้นิยามค่าระยะ  $\lambda$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการสังเกตผลของความเร็วในการหมุนและความหนืดของสารในระบบ ซึ่งนิยามมาจากสมการที่ 4.7 ดังแสดงในสมการที่ 4.8 จากผลการศึกษาพบว่าที่ค่า  $r_s$  เท่ากับ  $\lambda$  ค่า  $E_k$  ในโซน synchronized จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.64 ดังนั้นในการจำลองระบบการผสมน้ำ และเฮปเทน นี้สามารถหาสมการประมาณค่า  $r_s$  ที่สถานะต่าง ๆ ตามขอบเขตที่ใช้ในการศึกษาได้ด้วยวิธีจากงานวิจัยของ Dongxiang Wang [34] โดยหาจากการพล็อตกราฟระหว่างค่าระยะ  $r_s$  กับค่าระยะ  $\lambda$  ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในกราฟรูปที่ 4.20 สามารถแสดงสมการประมาณค่า  $r_s$  สำหรับระบบการผสมน้ำ และเฮปเทนในเครื่อง SDR ที่ดำเนินการด้วยจานหมุนแบบผิวเรียบได้ดังนี้

$$r_s = 1.3209\lambda \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $r_s$  กับ ค่า  $\lambda$  ที่ได้จากการดำเนินการที่สภาวะต่าง ๆ



รูปที่ 4.21 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อโปรไฟล์ความเร็วที่อัตราการไหลเท่ากับ 5 ml/s และ ความเร็วในการหมุนเท่ากับ 1000 rpm

$$E_{ks} = \left(\frac{2\pi}{3}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{r_s^4 \omega v}{Q^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.7)$$

$$\lambda = \left(\frac{Q^2}{\omega v}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.8)$$

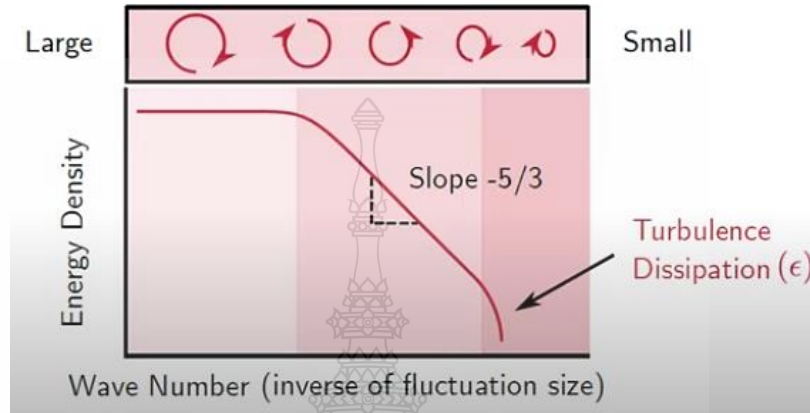
จากรูปที่ 4.21 สามารถแสดงผลของการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่อโปรไฟล์ความเร็วที่ อัตราการไหลเท่ากับ 5 ml/s และความเร็วการหมุนเท่ากับ 1000 rpm จากผลการจำลองกระบวนการพบว่า โปรไฟล์ความเร็วของสารผสมที่ดำเนินการด้วยจานหมุนแบบผิวหยาบ มีลักษณะเป็นแบบลูกคลื่น ซึ่งตรงกับ รูปแบบการไหลแบบ wavy film flow [37] ในเครื่อง SDR เมื่อเทียบกับโปรไฟล์ความเร็วของจานหมุนแบบ ผิวเรียบที่มีรูปแบบการไหลแบบฟิล์มของเหลว (liquid film flow) ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบผลของ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้ด้วยระยะ  $r_s$  แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟความเร็วในแนวรัศมีจะ พบว่าพื้นผิวจานหมุนแบบขรุขระมีเส้นแนวโน้มของค่าความเร็วในแนวรัศมีที่สูงกว่า

จากการเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวบนจานหมุนสามารถเปรียบเทียบการไหลปั่นป่วนที่ เพิ่มขึ้นในเครื่อง SDR ได้ด้วยค่าอัตราการแยกสลาย (dissipation rate;  $\epsilon$ ) ที่เป็นอัตราการถ่ายโอน ปริมาณพลังงานจากจานหมุนไปสู่ของไหลในระบบ [38] ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดการไหลแบบ ปั่นป่วนสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.22 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $\epsilon$  เฉลี่ยโดยคำนวณจากสมการที่ 4.10 ระหว่างจานหมุนแบบผิวเรียบ และแบบผิวขรุขระผลที่ได้พบว่าค่า  $\epsilon$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเร็วใน การหมุน โดยที่จานหมุนแบบผิวขรุขระจะมีแนวโน้มของค่า  $\epsilon$  ที่มากกว่าจานหมุนแบบผิวเรียบที่สภาวะการ ดำเนินการเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.23

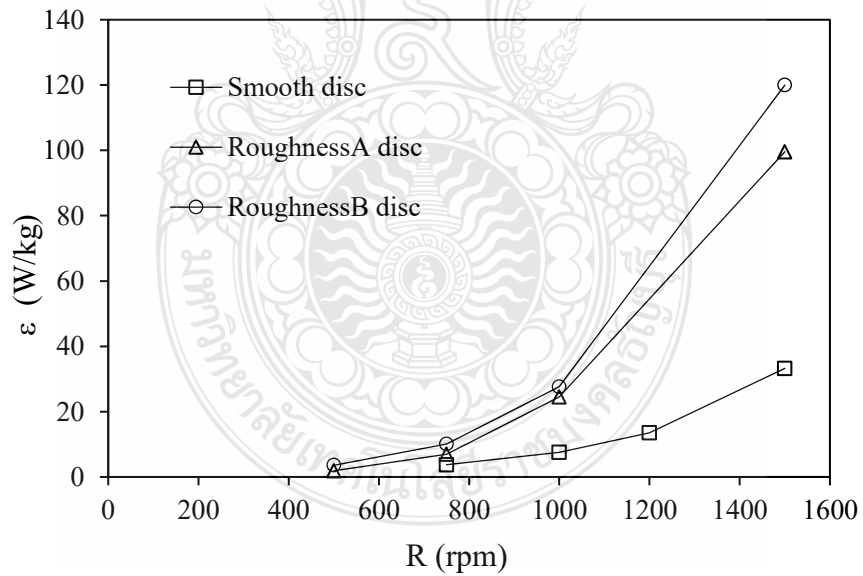
จากค่า  $\epsilon$  เฉลี่ยที่คำนวณมาจากสมการที่ 4.10 สามารถนำมาคำนวณค่าเวลาในการผสม ในระดับไมครอน (micromixing time;  $t_{micro}$ ) ได้ตามงานวิจัยของ Sahr Sana และคณะ [39] ดังแสดงใน สมการที่ 4.11 โดยมีเงื่อนไขในการใช้สมการ คือ ค่าเลขชมิคท์ (schmidt number;  $Sc$ ) ต้องมีค่าน้อยกว่า 4000 ในการศึกษาครั้งนี้มีค่า  $Sc$  เท่ากับ 762 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity coefficient) เท่ากับ  $1.129 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  [40] จากผลการศึกษาพบว่าค่า  $t_{micro}$  มีค่าลดน้อยลงเมื่อทำการเพิ่มความขรุขระแก่พื้นผิว ของจานหมุน โดยจานหมุนแบบผิวเรียบ และแบบผิวหยาบ A จะให้ค่า  $t_{micro}$  เท่ากับ 0.00819 s ถึง 0.00276 s และ 0.006 s ถึง 0.002 s ตามลำดับที่ค่า R เพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 1500 rpm

$$\varepsilon = \frac{1}{V} \int \varepsilon dV \quad (4.10)$$

$$t_{micro} = 17.2 \left( \frac{V}{\varepsilon} \right)^{0.5} \quad (4.11)$$

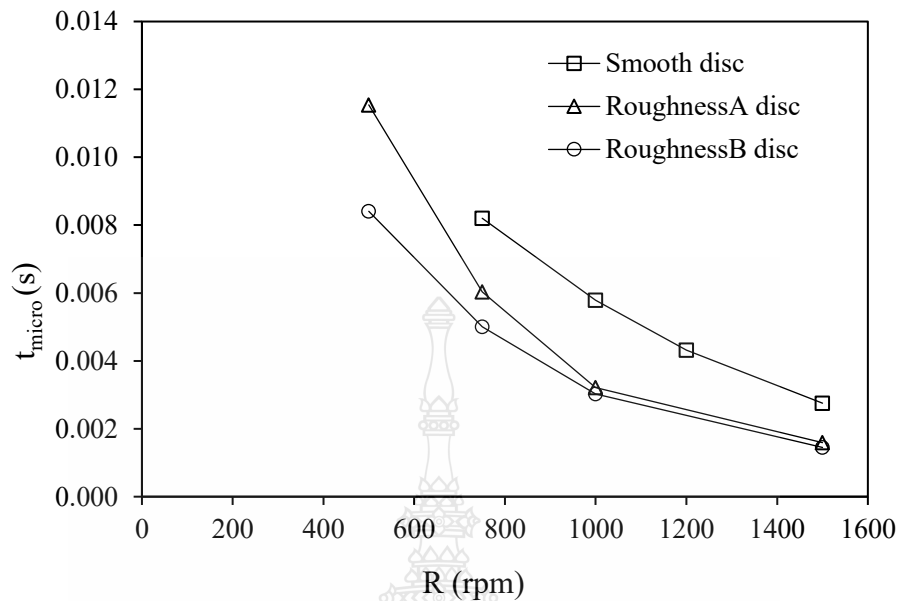


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\varepsilon$  กับขนาดของการไหลแบบ Eddy ในระบบ



รูปที่ 4.23 ผลของพื้นผิวของจานหมุนต่อค่า  $\varepsilon$  เฉลี่ยบนจานหมุนที่ความเร็วการหมุนในช่วง 700 ถึง 1500 rpm



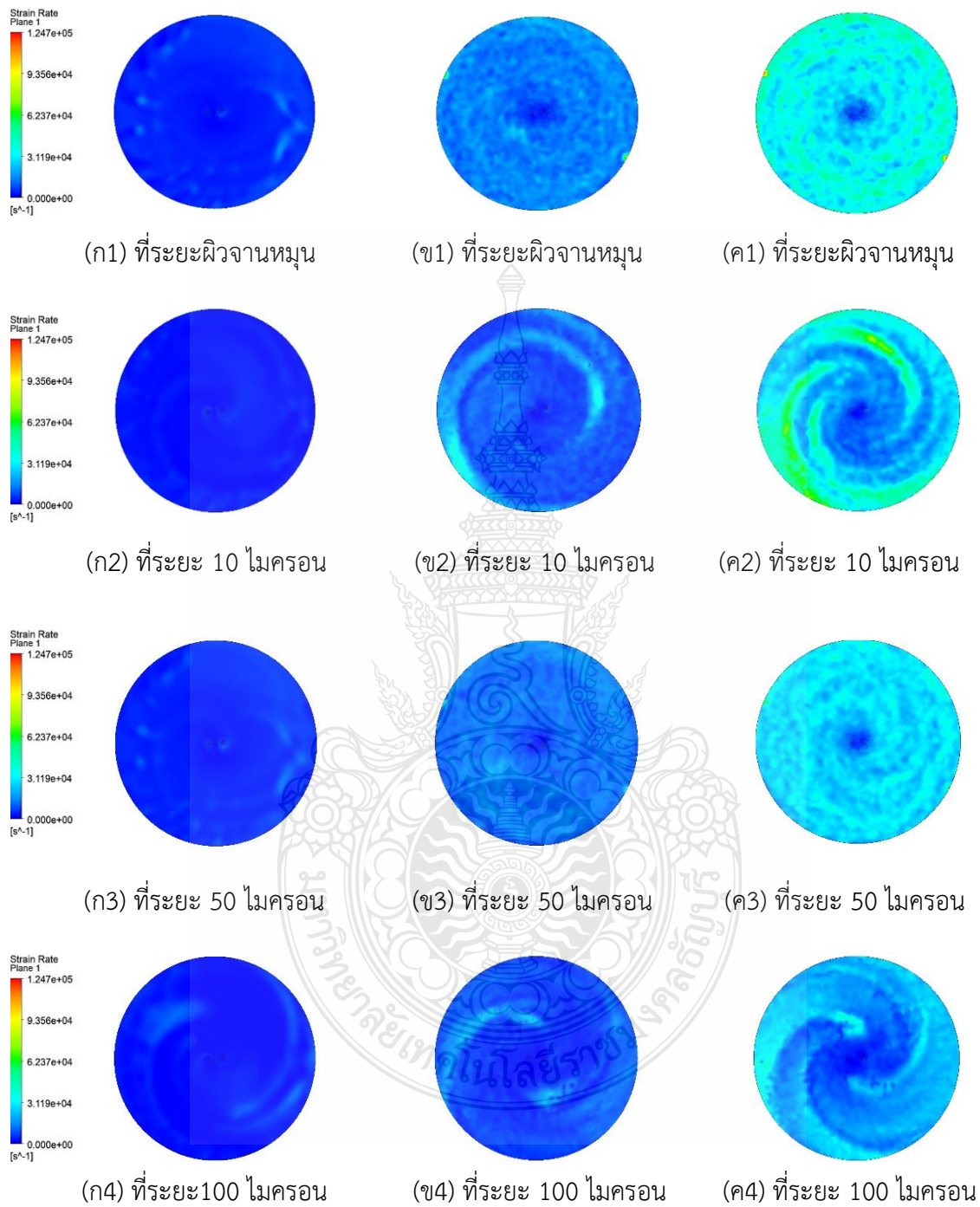


รูปที่ 4.24 ผลของพื้นผิวของจานหมุนต่อค่า  $t_{micro}$  ที่ความเร็วการหมุนในช่วง 700 ถึง 1500 rpm และ อัตราการไหลเท่ากับ 5 ml/s

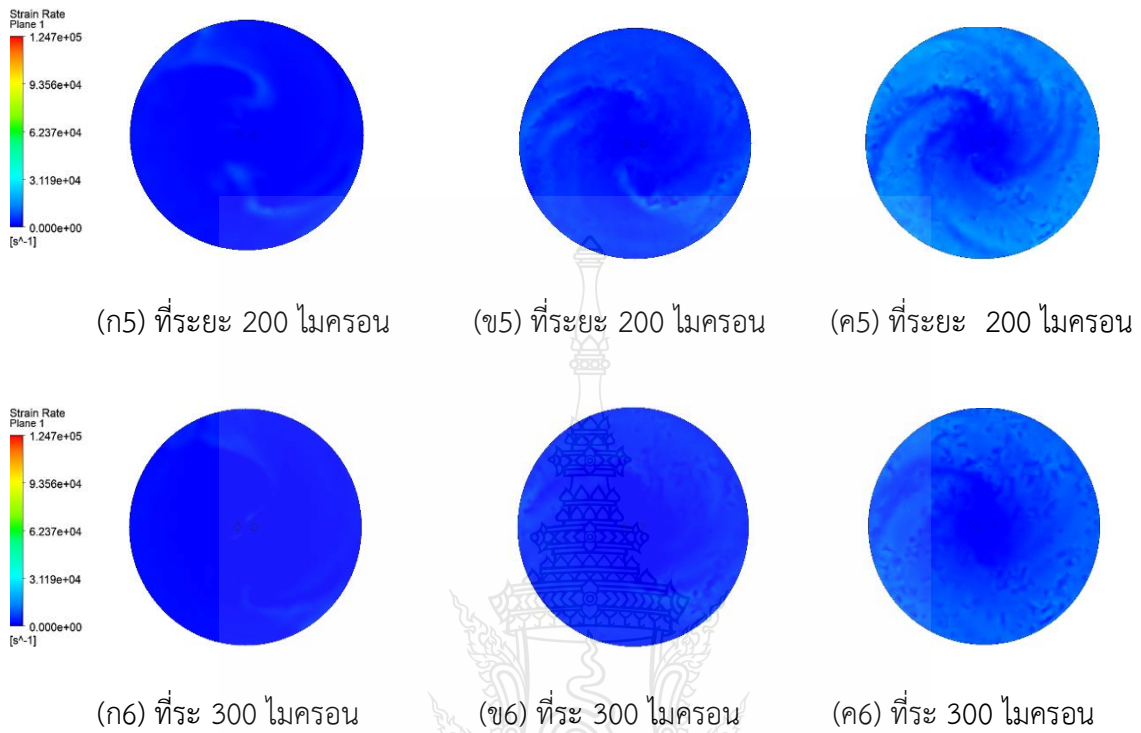
จากผลการจำลองกระบวนการเมื่อพิจารณาที่นิยามค่า  $t_{micro}$  จากงานวิจัยของ Salah Al-hengari ได้อธิบายไว้ว่าค่า  $t_{micro}$  เป็นเวลาที่ทำให้สารในระบบเกิดการผสมอย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุลซึ่งทำให้เกิดการแพร่ของสารละลายไปยังวัฏภาคอื่น [41] โดยค่า  $t_{micro}$  จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารละลาย และค่า  $\epsilon$  ในระบบดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.11 ดังนั้นจากผลการทดลองการลดลงของค่า  $t_{micro}$  เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุน และเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวนั้นส่งผลให้น้ำและเฮปแทนเกิดการผสมในระดับโมเลกุลได้เร็วขึ้นอันเป็นผลมาจากการปรับปรุงค่า  $\epsilon$  ซึ่งนับเป็นผลดีต่อการถ่ายโอนมวลในระบบ

#### 4.3.6 ผลการปรับความเร็วการหมุน และอัตราการไหลต่อแรงเฉือนภายในชั้นฟิล์ม

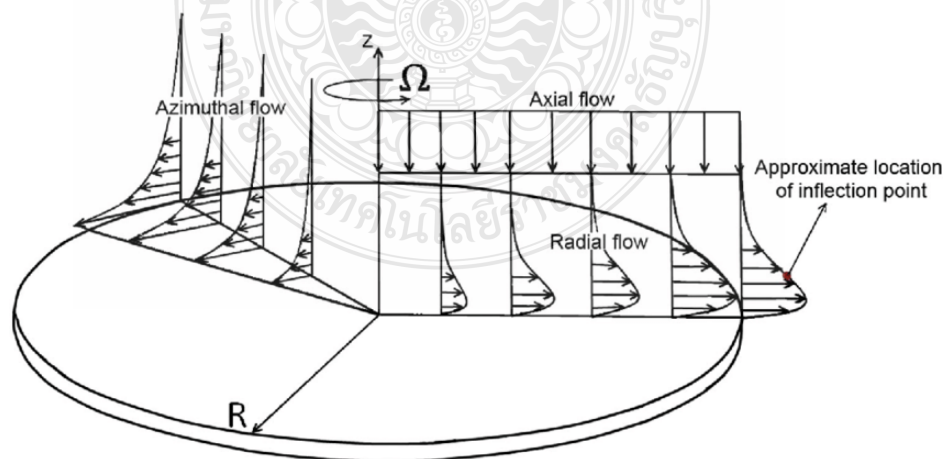
รูปที่ 4.25 แสดงผลของความเร็วในการหมุน ต่ออัตราเฉือนภายในชั้นฟิล์มที่อัตราการไหลเท่ากับ 5 ml/s จากผลการศึกษาพบว่าอัตราเฉือนภายในชั้นฟิล์มมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเร็วการหมุนทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมบนจานหมุนในรูปที่ 4.18 ในหัวข้อที่ 4.3.5 โดยผลลัพธ์ที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sahr Sana และคณะ [42]



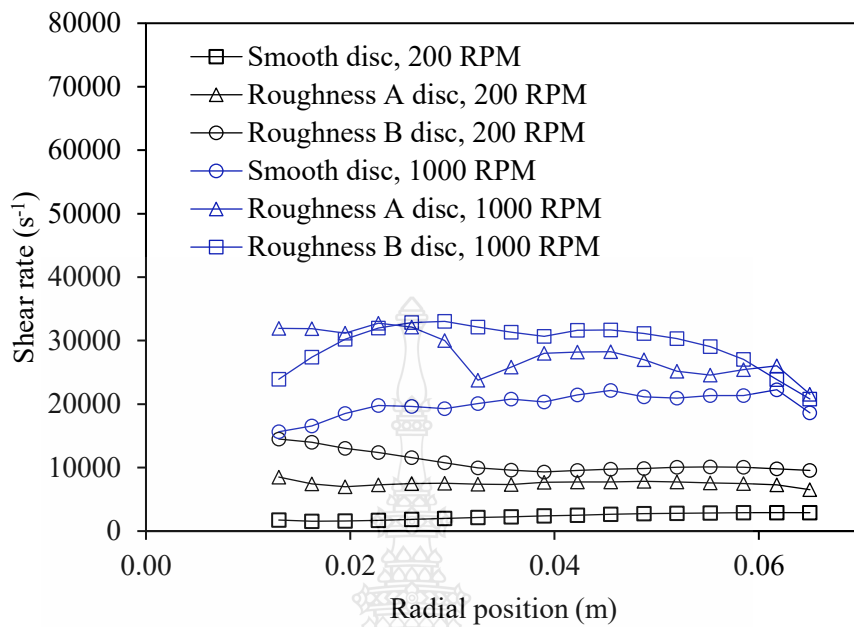
รูปที่ 4.25 แสดงผลของความเร็วจานหมุนต่ออัตราเฉือนภายในชั้นฟิล์มที่อัตราการไหล 5 ml/s (ก) R = 200 rpm (ข) R = 700 rpm และ (ค) R = 1,500 rpm



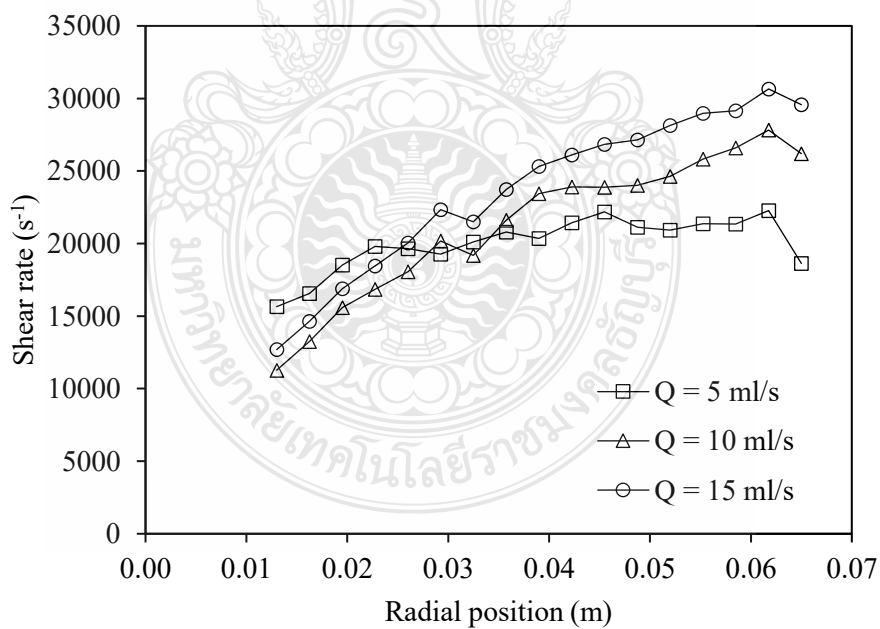
รูปที่ 4.25 (ต่อ) แสดงผลของความเร็วการหมุนต่ออัตราเฉือนภายในชั้นฟิล์มที่อัตราการไหล 5 ml/s  
 (ก) R = 200 rpm (ข) R = 700 rpm และ (ค) R = 1,500 rpm



รูปที่ 4.26 แสดงองค์ประกอบของโปรไฟล์ความเร็วในแนวแกนต่าง ๆ บนจานหมุน



รูปที่ 4.27 ผลของอัตราการไหลต่ออัตราเฉือนเฉลี่ยตามแนวแกนรัศมีที่ค่า R เท่ากับ 1000 rpm

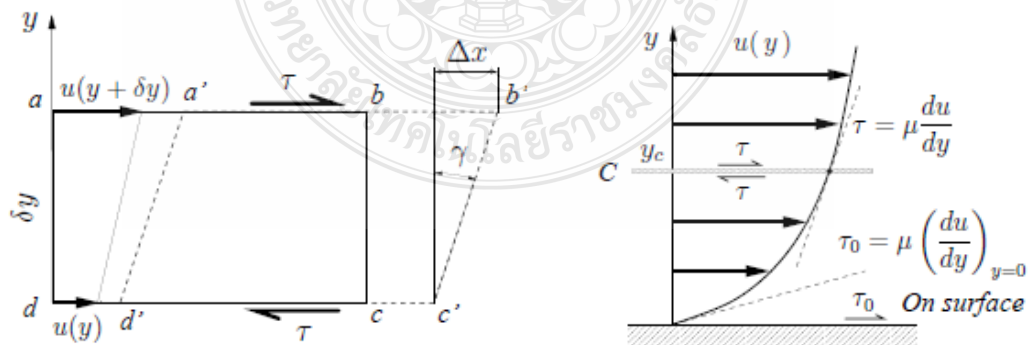


รูปที่ 4.28 ผลการปรับพื้นผิวของจานหมุนต่ออัตราการเฉือนที่อัตราการไหลเท่ากับ 5 ml/s และความเร็วการหมุนเท่ากับ 200 และ 1000 rpm

รูปที่ 4.28 แสดงผลของอัตราการไหล ต่ออัตราเฉือนภายในชั้นฟิล์มที่ความเร็วในการหมุนเท่ากับ 1000 rpm พบว่าอัตราเฉือนจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลในระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่กับอัตราเฉือนของชั้นฟิล์มของเหลวดังแสดงในสมการที่ 4.11 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราเฉือนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าอัตราการไหล และความเร็วในการหมุน

$$\dot{\gamma} = \frac{R^2 r}{\nu} (h - z) \quad (4.11)$$

รูปที่ 4.27 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราเฉือนในฟิล์มของเหลวระหว่างผิวจานหมุนแบบผิวเรียบ และแบบผิวหยาบ A และ B ดำเนินการที่ความเร็วการหมุน 200 และ 1000 rpm และอัตราการไหล 5 ml/s จากผลการศึกษาพบว่าอัตราเฉือนของจานหมุนแบบผิวหยาบ A มีค่ามากกว่าอัตราเฉือนของจานหมุนแบบผิวเรียบ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มความขรุขระให้พื้นผิวเรียบเสมือนการเพิ่มแรงต้านทานการเคลื่อนที่ (friction force) ส่งผลให้เกรเดียนต์ของความเร็วเชิงเส้น (tangential velocity gradient;  $dv/dz$ ) มีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีอัตราเฉือนภายในระบบเพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนต์ของความเร็วเชิงเส้น ( $dv/dz$ ) กับอัตราเฉือนสามารถแสดงรายละเอียดได้ด้านล่างนี้ [43] เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.29 ที่เวลา  $t = 0$  s ทุกอนุภาคในระบบมีทิศการเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกัน แต่มีขนาดความเร็วในแกน  $y$  ที่ต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไปเล็กน้อยปรากฏว่าปริมาตรควบคุมมีการเคลื่อนที่จาก  $abcd$  เป็น  $a'b'c'd'$  เมื่อ  $|aa'| = |bb'| = u(y + \delta y) \Delta t$  และ  $|cc'| = |dd'| = u(y) \Delta t$  ดังนั้นสามารถหาอัตราเฉือนได้ดังนี้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนต์ของความเร็วเชิงเส้น ( $dv/dz$ ) กับอัตราเฉือน [42]

$$\gamma = \frac{\Delta x}{\delta y} = \frac{(u(y + \delta y) - u(y)) \Delta t}{\delta y} \quad (4.12)$$

เมื่อพิจารณาที่  $t$  มีค่าน้อยมากๆ สมการอัตราเฉือนสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\gamma = \frac{dy}{dt} \Delta t$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{(u(y + \delta y) - u(y))}{\delta y}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (4.13)$$

จากผลการจำลองกระบวนการผสมน้ำ-เฮปแทน พบว่าการปรับความเร็วการหมุน อัตราการไหล และพื้นผิวของจานหมุน มีผลกระทบ ทั้งแง่บวก และลบ ต่อความสามารถในการถ่ายโอนมวลสามารถอธิบายได้ด้วย รูปแบบการผสม ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว พื้นที่ผิวสัมผัส เวลาคงอยู่ โปรไฟล์ความเร็ว และอัตราเฉือนของสารผสมบนจานหมุน ซึ่งจากผลการจำลองกระบวนการนี้สามารถสรุปผลของการปรับตัวแปรเพื่อหาสภาวะการดำเนินการที่ดีที่สุดสำหรับเครื่อง SDR ได้ดังนี้

(1). รูปแบบการไหลของเฮปแทน : จากผลการศึกษาพบว่า การกระจายตัว และความหนาของเกลียวหมุนของเฮปแทนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า  $R$  และมีค่าลักษณะที่เล็กลงเมื่อเพิ่มค่า  $Q$  เมื่อเปรียบเทียบผลของพื้นผิวของจานหมุนพบว่าการเปลี่ยนผิวของจานหมุนจากแบบผิวเรียบ เป็นแบบผิวขรุขระส่งผลต่อรูปแบบการไหลของเฮปแทนในเครื่อง SDR เล็กน้อย โดยพื้นผิวจานหมุนแบบผิวหยาบจะมีความหนาของเกลียวหมุนที่เล็กกว่า

(2). ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลว : จากผลการศึกษาพบว่าค่าความสูงของชั้นฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามค่า  $R$  โดยในช่วงความเร็วรอบต่ำ คือ 200 ถึง 500 rpm จะมีการลดลงของค่าความสูงของชั้นฟิล์มที่มากกว่า เมื่อเทียบกับค่าความสูงของชั้นฟิล์มที่ความเร็วรอบสูง คือ มากกว่า 500 rpm เมื่อพิจารณาที่การเพิ่มค่า  $Q$  ค่าความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนพื้นผิวของจานหมุนจะพบว่าพื้นผิวจานหมุนแบบผิวหยาบจะให้ค่าความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวที่ต่ำกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบที่ความเร็วการหมุนต่ำ คือ 200 rpm และเมื่อดำเนินการที่ความเร็วการหมุนสูง คือ 1500 rpm ค่าความสูงของชั้นฟิล์มจากพื้นผิวของจานหมุนทั้งสองชนิดมีค่าที่ไม่ต่างกัน

(3) ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส : จากผลการศึกษาพบว่าค่า  $a_{int}$  จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่า R จนกระทั่งค่า R มากกว่า 700 rpm การเพิ่มขึ้นของค่า  $a_{int}$  จะมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ในช่วงค่า R น้อยกว่า 700 rpm เมื่อพิจารณาที่ผลของค่า Q พบว่าที่อัตราการไหล 5 ml/s จะให้ค่า  $a_{int}$  สูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลของพื้นผิวของจานหมุนพบว่า พื้นผิวจานหมุนแบบหยาบจะให้ค่า  $a_{int}$  ที่สูงกว่าพื้นผิวจานหมุนแบบเรียบซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทาน (friction force) บนผิวของจานหมุน

(4) ค่าเวลาคงอยู่ : จากผลการศึกษาพบว่าค่า  $t_m$  ของสารทั้งสองชนิดบนจานหมุนจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า R โดยที่ค่า  $t_{m-hep}$  จะมีค่าต่ำกว่า  $t_{m-wat}$  ซึ่งเป็นมาจากความหนาแน่น และความหนืดของเฮปแทนที่ต่ำกว่าของน้ำ เมื่อพิจารณาที่ผลของค่า Q พบว่าที่อัตราการไหล 5 ml/s จะหาค่า  $t_m$  สูงสุด และเมื่อพิจารณาที่ผลของพื้นผิวของจานหมุนพบว่าพื้นผิวจานหมุนแบบหยาบจะให้ค่า  $t_m$  ที่ต่ำกว่าพื้นผิวจานหมุนแบบเรียบ

(5) โปรไฟล์ความเร็ว : จากผลการศึกษาพบว่าเส้นแนวโน้มของโปรไฟล์ความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของค่า R โดยจากโปรไฟล์ความเร็วนี้เราสามารถเปรียบเทียบผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้จากระยะของ  $r_s$  ซึ่งเป็นระยะของโซน synchronized ที่มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสูงที่สุด จากการเพิ่มขึ้นของค่า R พบว่าค่า  $r_s$  มีระยะที่ลดลงจากจุนศูนย์กลางของจานหมุน โดยที่ค่า R มากกว่า 500 rpm การลดลงของระยะ  $r_s$  จะมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับค่า R ที่ค่าต่ำกว่า 500 rpm เมื่อพิจารณาผลของค่า Q พบว่าระยะของ  $r_s$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉื่อย (inertial force) ที่เพิ่มขึ้นในระบบ และเมื่อเปรียบเทียบผลของพื้นผิวของจานหมุนที่ค่า R เท่ากับ 1000 rpm จะพบว่าโปรไฟล์ความเร็วสำหรับพื้นผิวจานหมุนแบบหยาบมีลักษณะตรงกับการไหลแบบ wavy film ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเสียดทานของพื้นผิวทำมีบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนที่มากกว่าการดำเนินการด้วยผิวจานหมุนแบบเรียบที่มีลักษณะการหมุนแบบฟิล์มของเหลว (liquid film) ที่สภาวะเดียวกัน

ดังนั้นสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่อง SDR คือ ที่อัตราการไหล 5 ml/s ในช่วงค่า R มากกว่า 700 rpm และพื้นผิวจานหมุนแบบขรุขระ เนื่องจากเป็นสภาวะที่ได้รับผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้ดีที่สุดโดยสามารถสังเกตได้จากความกว้างของโซน synchronized ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส และอัตราเฉือนของสารผสมบนจานหมุนที่มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการดำเนินการอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามการดำเนินการด้วยเครื่อง SDR ที่สภาวะค่า R มากกว่า 700 rpm และอัตราการไหลต่ำ คือ 5 ml/s กลับพบว่าค่าเวลาคงอยู่มีค่าที่ลดลง รวมถึงค่า พื้นที่ผิวสัมผัสที่สภาวะนี้เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ด้วยเหตุนี้

เพื่อระบุสภาวะการดำเนินที่เหมาะสมให้มีความชัดเจนขึ้น จึงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง กระบวนการกับผลการทดลองแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

#### 4.4 ผลการทดลองการสกัด

##### 4.4.1 รูปแบบการไหลของสารเฮปแทนในเครื่อง SDR

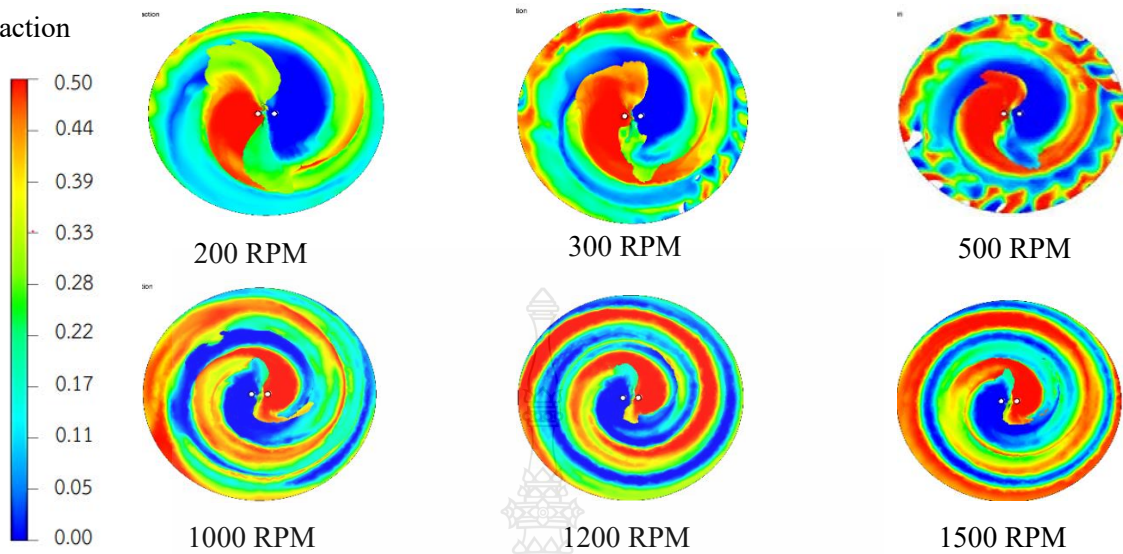
รูปที่ 4.30 แสดงรูปแบบการไหลของสารเฮปแทนในเครื่อง SDR ที่ความเร็วการหมุนในช่วง 200 ถึง 1500 rpm และอัตราการไหล 5 ml/s รูปแบบการไหลของเฮปแทนที่พบมีลักษณะเป็นเกลียวหมุน เมื่อเพิ่มความเร็วการหมุนความหนาของหมุนจะมีขนาดที่ลดลงในขณะที่จำนวนรอบของเกลียวหมุนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการจำลองรูปแบบการไหลของเฮปแทนในรูปที่ 4.8 โดยที่ความเร็วการหมุนมากกว่า 500 rpm ด้วยความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวมีขนาดที่บางมาก ๆ ถ้าเทียบกับผลการจำลองจะพบว่ามีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่  $150 \mu\text{m}$  จากผิวของจานหมุน ดังนั้นในการทดลองจึงไม่สามารถจับภาพรูปแบบการไหลที่ค่า R มากกว่า 500 rpm

##### 4.4.2 ผลของการปรับความเร็วในการหมุน

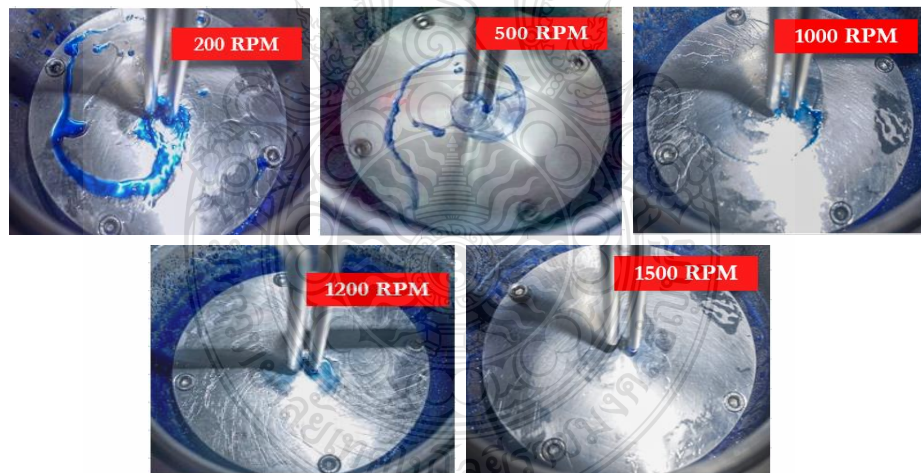
รูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงผลของความเร็วการหมุน (R) ต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล ในเครื่อง SDR ที่อัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทนเท่ากับ 1:1 และอัตราการไหลค่าต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนประสิทธิภาพการสกัด (E) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ( $k_{La}$ ) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มค่า R จาก 200 rpm เป็น 1000 rpm ค่า E และ  $k_{La}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 19.67 เป็น 39.07 และ 0.8 เป็น  $6.84 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการสกัดที่เพิ่มมากขึ้นนี้คาดว่าเป็นผลมาจากการปรับปรุงแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จากการเพิ่มค่าความเร็วในการหมุน แต่เมื่อเพิ่มค่า R มากกว่า 1000 rpm พบว่าค่า E มีค่าลดลงเล็กน้อย ถึงแม้ว่า  $k_{La}$  ยังมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่โดยผลจากการจำลองกระบวนการผสมในระบบ น้ำ – เฮปแทนสามารถใช้ในการอธิบายผลของค่า R ต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลนี้ได้ว่า แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสามารถปรับปรุงให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มค่า R ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความกว้างของโซน synchronized ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.19 ส่งผลให้ความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวลดลง และการกระจายตัวของสารผสมบนจานหมุนมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้แรงเฉือนภายในชั้นฟิล์ม และค่า  $a_{int}$  ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นดังแสดงรายละเอียดในกราฟรูปที่ 4.14 และ 4.23 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ค่า R ในช่วง 200 ถึง 1000 rpm จึงมีแนวโน้มของค่า E และ  $k_{La}$  ที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่การลดลงของค่า E ที่ค่า R



Heptane volume fraction



(ก) รูปแบบการไหลของเฮปเทนจากการจำลองกระบวนการ



(ข) รูปแบบการไหลของเฮปเทนจากการทดลอง

รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบรูปแบบการไหลของเฮปเทน ที่อัตราการไหล 200 ถึง 1500 รอบต่อนาที และอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อวินาที (ก) การจำลองกระบวนการ และ (ข) ผลการทดลอง

มากกว่า 1000 rpm สามารถอธิบายได้ด้วยการลดลงของค่า  $t_{res}$  ในขณะที่ค่า  $a_{int}$  ในช่วงค่า R มากกว่า 700 rpm เริ่มมีค่าคงที่กล่าวคือในช่วงค่า R มากกว่า 1000 rpm การเพิ่มขึ้นของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเริ่มมีค่าลดน้อยลง ในขณะที่การลดลงของค่า  $t_{res}$  เริ่มมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า E มีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ค่า  $k_{La}$  จะเห็นได้ว่ายังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอยู่เนื่องจากยังคงได้รับผลการปรับปรุงของการหมุนวน (liquid circulation) จากการป้อนสารผสมเข้าเครื่อง SDR ซึ่งมีผลทางบวกต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลมากกว่าเมื่อเทียบกับผลการลดลงของค่า  $t_{res}$  ของสารผสมบนเครื่อง SDR

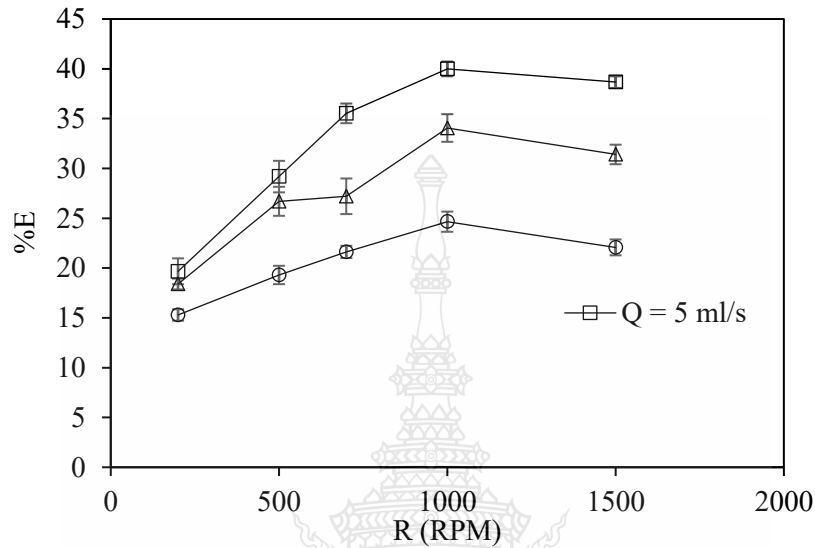
#### 4.4.3 ผลของการปรับอัตราการไหล

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 เมื่อเปรียบเทียบผลของการปรับอัตราการไหล (Q) ต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารผสมค่า E มีแนวโน้มที่ลดน้อยลงในขณะที่ค่า  $k_{La}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหล 5 ml/s ค่า E และ  $k_{La}$  ที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 19.67 ถึง 38.66 และ 0.80 ถึง 6.84  $s^{-1}$  เมื่อเพิ่มค่า Q เป็น 15 ml/s ช่วงของค่า E และ  $k_{La}$  เปลี่ยนเป็นคือร้อยละ 15.28 เป็น 22.63 และ 1.26 ถึง 7.26  $s^{-1}$  จากผลการจำลองกระบวนการพบว่าสาเหตุที่ทำให้ค่า E ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มค่า Q คือ ผลของแรงเฉื่อย (inertial force) ที่เพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มอัตราการไหลในระบบซึ่งสามารถสังเกตได้จากความกว้างของโซน synchronized ที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.20 ทำให้การเพิ่มประสิทธิภาพการผสมด้วยผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากการเพิ่มขึ้นของค่า R ลดต่ำลง สามารถสังเกตได้จากค่า  $a_{int}$  ที่ต่ำลงซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของการกระจายตัวของสารเฮปแทนในระบบดังแสดงผลลัพธ์ของค่า  $a_{int}$  และรูปแบบการไหลของเฮปแทนในรูปที่ 4.14 และ 4.18(ข) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า  $k_{La}$  จะพบว่าผลของการปรับปรุงการหมุนวน (circulation) ในระบบจากการเพิ่มอัตราการไหลยังคงมีอิทธิพลเหนือแรงเฉื่อยที่เพิ่มขึ้น

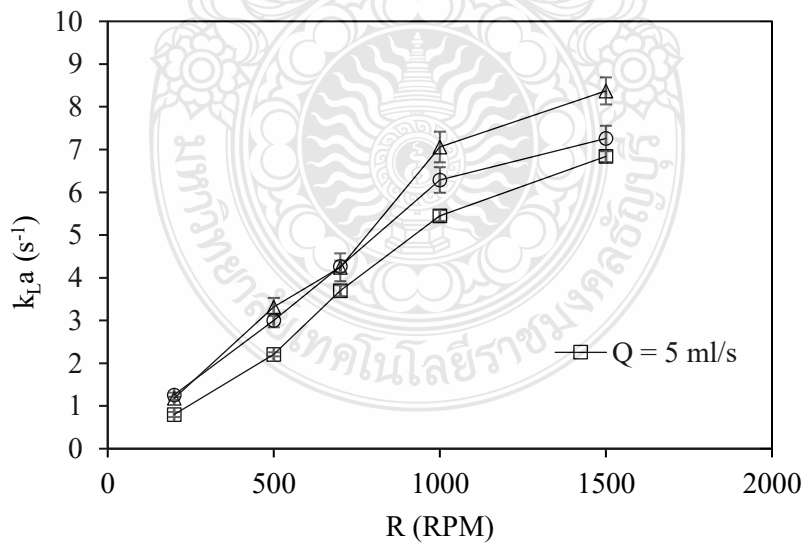
#### 4.4.4 ผลของการปรับอัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทน

จากรูปที่ 4.33 และ 4.34 แสดงผลของการปรับอัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทน ( $\theta$ ) ต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลในเครื่อง SDR ที่อัตราการไหล เท่ากับ 5 ml/s และความเร็วในการหมุนค่าต่าง ๆ ผลที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทนค่า E และ  $k_{La}$  มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทนเท่ากับ 1:1 ค่า E และ  $k_{La}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วงร้อยละ 19.67 ถึง 38.67 และ 0.80 ถึง 6.84  $s^{-1}$  เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทนเป็น 5:1 ค่า E และ  $k_{La}$  ที่วัดได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 69.45 ถึง 86.40 และ 4.25 ถึง 27.62  $s^{-1}$  ซึ่งการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลนี้เป็นผลมาจากปริมาณตัวทำละลายในระบบที่

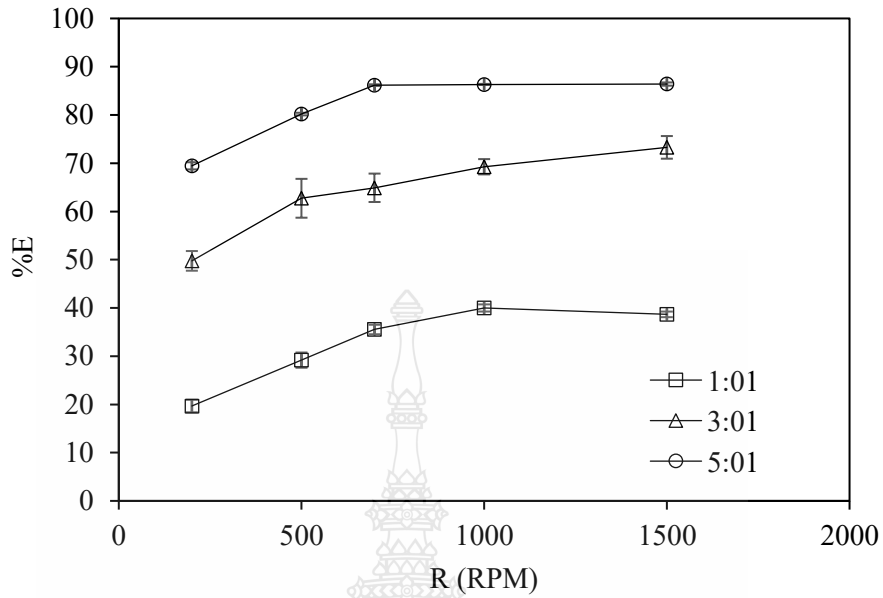
สูงขึ้นซึ่งมีหน้าในการติงกรดเบนโซอิกออกจากเฮปแทนตั้งนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวทำละลายจึงทำให้ค่า E และ  $k_{La}$  เพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yubin Wang และคณะ [17]



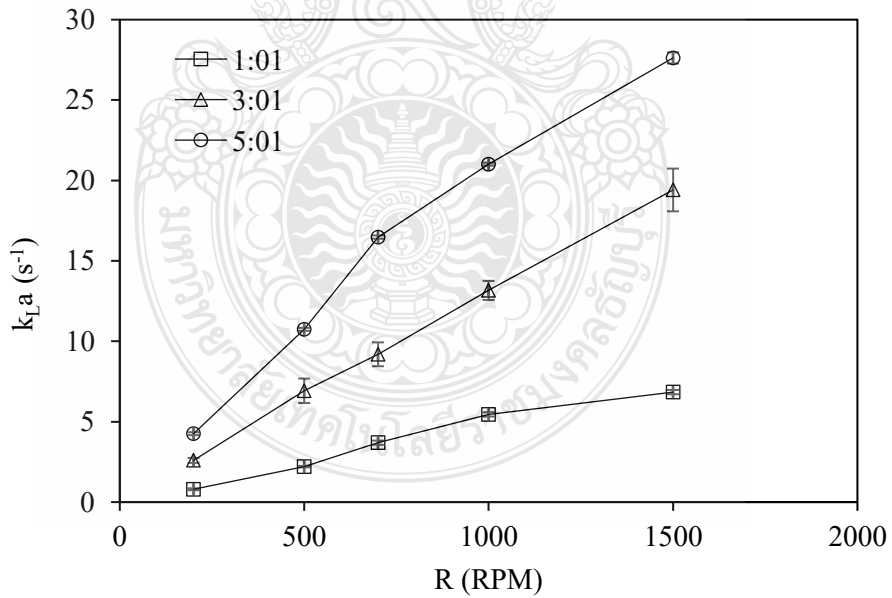
รูปที่ 4.31 ผลของความเร็วยรอบต่อค่าประสิทธิภาพการสกัดที่ Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า  $\theta$  เท่ากับ 1:1



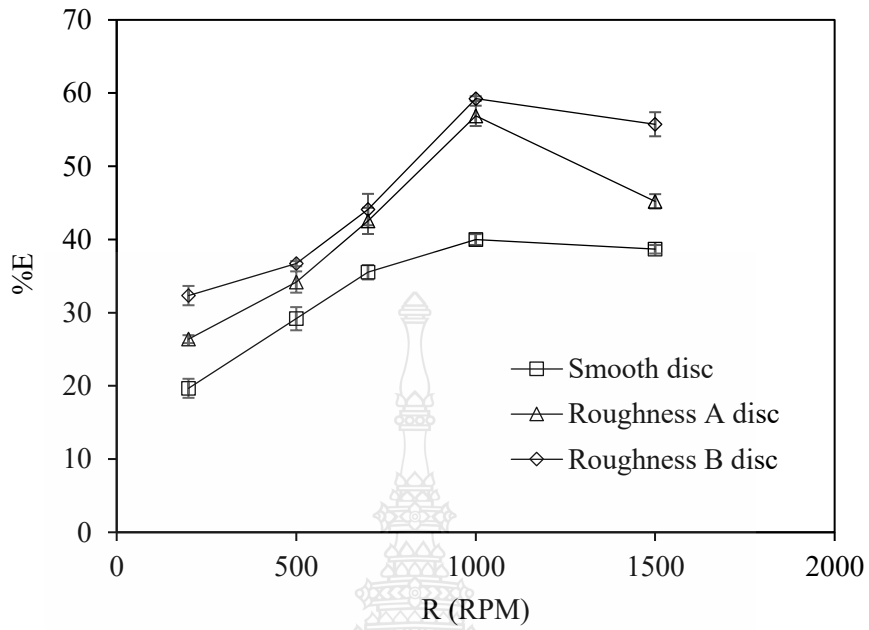
รูปที่ 4.32 ผลของความเร็วยรอบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ Q เท่ากับ 5 ml/s และค่า  $\theta$  เท่ากับ 1:1



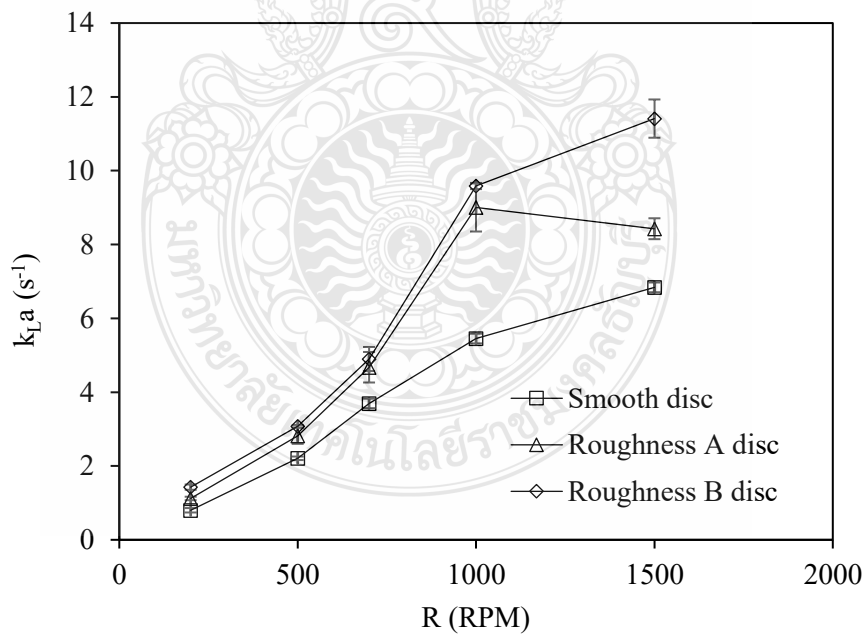
รูปที่ 4.33 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทน ( $\theta$ ) ต่อค่าประสิทธิภาพการสกัดที่ ความเร็วรอบค่าต่าง ๆ และค่า Q เท่ากับ 5 ml/s



รูปที่ 4.34 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทน ( $\theta$ ) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ความเร็วรอบค่าต่าง ๆ และค่า Q เท่ากับ 5 ml/s



รูปที่ 4.35 ผลของผิวของจานหมุนต่อประสิทธิภาพการสกัด



รูปที่ 4.36 ผลของพื้นผิวของจานหมุนต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

#### 4.4.5 ผลของการปรับพื้นผิวของจานหมุน

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 แสดงผลประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลเปรียบเทียบระหว่างพื้นผิวจานหมุนแบบผิวเรียบ พื้นผิว Roughness A (กระดาษทรายเบอร์ 36) และพื้นผิว Roughness B (กระดาษทรายเบอร์ 24) ที่อัตราส่วนน้ำต่อเฮปแทน ( $\theta$ ) เท่ากับ 1:1 อัตราการไหลเท่ากับ 5 ml/s และความเร็วในการหมุนเท่ากับ 1000 rpm ผลที่ได้พบว่าค่า E และ  $k_{La}$  มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปลี่ยนพื้นผิวเป็นแบบขรุขระ โดย ค่า E และ  $k_{La}$  ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 19.67 ถึง 38.67 และ 0.80 ถึง 6.84  $s^{-1}$  เป็นร้อยละ 26.39 ถึง 45.21 และ 1.12 ถึง 8.43  $s^{-1}$  สำหรับผิวหยาบ A, ร้อยละ 29.02 ถึง 59.39 และ 1.257 ถึง 11.39  $s^{-1}$  สำหรับผิวหยาบ B

จากผลการจำลองกระบวนการผสมพบว่าสาเหตุที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลเพิ่มมากขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนพื้นผิวของจานหมุนจากแบบผิวเรียบเป็นแบบผิวขรุขระส่งผลให้ค่า  $a_{int}$  และอัตราเฉือนของสารผสมในเครื่อง SDR มีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.26 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่โปรไฟล์ความเร็วของสารผสมบนจานหมุนจะพบว่ารูปแบบการไหลของสารผสมบนจานหมุนมีการเปลี่ยนจากการไหลแบบฟิล์มของเหลว (liquid film) เป็นการไหลแบบ wavy film เมื่อทำการเปลี่ยนพื้นผิวของจานหมุนจากผิวเรียบเป็นผิวขรุขระซึ่งเป็นรูปแบบการไหลที่มีบริเวณที่สารมีการไหลแบบปั่นป่วนมากกว่าจึงอาจเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นผิวหยาบ A และผิวหยาบ B จะพบว่าพื้นผิวที่มีความหยาบสูงที่สุด (วัดจากค่าความขรุขระดังแสดงในภาคผนวก ข) นั่นคือผิวหยาบ B จะให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลที่ดีกว่าพื้นที่ผิวที่ละเอียด เนื่องจากความสามารถในการก่ตัวของสารไหลแบบปั่นป่วนที่ดีกว่าซึ่งวัดจากค่า  $\epsilon$  ดังแสดงในรูปที่ 4.23

#### 4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล

จากผลการทดลองในระบบสกัด น้ำ — กรดเบนโซอิก/เฮปแทน พบว่าค่าประสิทธิภาพการสกัด เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ พบว่าเครื่อง SDR สำหรับจานหมุนแบบผิวเรียบมีค่า  $k_{La}$  สูงกว่าเครื่อง RSSDR ที่ดำเนินการด้วยความเร็วรอบต่ำประมาณ 80 เท่า และสูงกว่าเครื่อง HSM ประมาณ 15 เท่า เมื่อดำเนินการในช่วงความเร็วรอบที่สูงกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า  $k_{La}$  ของเครื่อง SDR ที่พื้นผิวจานหมุนชนิดต่าง ๆ พบที่จานหมุนแบบผิวหยาบ B มีค่า  $k_{La}$  สูงที่สุด ตามมาด้วยผิวหยาบ A และจานหมุนแบบผิวเรียบตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่าง ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบระบบที่ใช้ในการดำเนินการก็มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น

Equipment	System	R (rpm)	$\tau$ (s)	%E	$k_{La}$ (s <sup>-1</sup> )	Ref.
RSSDR*	TBP — Kerosene /phosphoric acid	120 to 170	57.24 to 95.40	72% to 82%	0.0039 to 0.149	[17]
HSM**	gas — liquid reaction	500 to 3000	-	-	0.2 to 0.8	[44]
SDR (smooth disc)	Water — Benzoic acid/n- heptane	200 to 1500	0.11 to 0.33	19.67 to 38.66	0.80 to 6.84	This work
SDR (Roughness A)	Water — Benzoic acid/n- heptane	200 to 1500	0.045 to 0.1077	26.38 to 45.21	1.12 to 8.43	This work
SDR (Roughness B)	Water — Benzoic acid/n- heptane	200 to 1500	0.022 to 0.038	31.46 to 57.26	1.43 to 11.83	This work

\* RSSDR represents the rotator – stator spinning disc reactor.

\*\* HSM represents the high shear mixer.

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การจำลองกระบวนการผสมในระบบ น้ำ — เฮปแทน สามารถดำเนินการได้ด้วยวิธี finite volume ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent โมเดล VOF ถูกใช้ในการศึกษาลักษณะของฟิล์มของเหลวในเครื่อง SDR เพื่อความแม่นยำในการจำลองกระบวนการ QUICK scheme ถูกใช้ในการ discretize สมการโมเมนตัมสำหรับเปลี่ยนสมการ PDE (partial differential equation) เป็นสมการพีชคณิตศาสตร์ (algebraic equation) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.7 โดยการวาดโครงสร้าง การตีเมช และการตั้งค่าขอบเขตรวมถึงการสอบเทียบของกระบวนการสามารถแสดงรายละเอียดได้ในหัวข้อที่ 4.1

จากผลการจำลองกระบวนการผสม น้ำ — เฮปแทน พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการหมุนเปรียบเสมือนการปรับปรุงผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางบนงานหมุนส่งผลให้ พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่าสูงขึ้น และเพิ่มอัตราเฉือนให้แก่สารผสมภายในชั้นฟิล์ม ในขณะที่ค่าเวลาคงอยู่จะมีค่าน้อยลงโดยผลของการลดลงของค่าเวลาคงอยู่จะเริ่มมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลเมื่อค่า R มากกว่า 1000 rpm เมื่อพิจารณาที่การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะพบว่าประสิทธิภาพการสกัดมีค่าที่ลดลงซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉื่อยในระบบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่าลดลงจากการลดลงของกระจายตัวของเฮปแทนในระบบ รวมถึงการลดลงของผลการปรับปรุงจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสามารถสังเกตได้จากความกว้างของโซน synchronized ที่ลดลง สุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลระหว่างพื้นผิวงานหมุนแบบเรียบ กับแบบผิวหยาบ พบว่าผิวงานหมุนแบบผิวหยาบจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าซึ่งเป็นผลมาจากความขรุขระของพื้นผิวส่งผลให้เพิ่มบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนในระบบซึ่งสามารถสังเกตได้จากโปรไฟล์ความเร็วของสารผสมที่มีลักษณะการไหลแบบ wavy liquid film รวมถึงอัตราเฉือนของสารผสมภายในชั้นฟิล์มของเหลวก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวงานหมุนแบบผิวเรียบ

จากผลการทดลองในระบบสกัด น้ำ — กรดเบนโซอิก/เฮปแทน พบว่าค่าประสิทธิภาพการสกัด เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ พบว่าเครื่อง SDR สำหรับงานหมุนแบบผิวเรียบมีค่า  $k_L a$  สูงกว่าเครื่อง RSSDR ที่ดำเนินการด้วยความเร็วรอบต่ำประมาณ 80 เท่า และสูงกว่าเครื่อง HSM ประมาณ 15 เท่า



## 5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย

1. เพิ่มลักษณะของผิวงานหมุนในการศึกษาให้หลากหลายมากขึ้น
2. การศึกษาในด้านการจำลองกระบวนการถ่ายโอนมวลเพื่อที่จะเปรียบเทียบความค่าเข้มข้นของกรดเบนโซอิกหลังผ่านกระบวนการสกัดระหว่างผลลัพท์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการ และการทดลอง



## บรรณานุกรม

- [1] Tsaoulidis, D., and Angeli, P. Liquid-liquid dispersions in intensified impinging-jets cells. *Chemical engineering science*, 2017. 171: p. 149-159.
- [2] Zaldivar, J. M., Zaldivar, J. M., Molga, E. J., Alos, M. A., and Hernandez, H., & Westerterp, K. R. Aromatic nitrations by mixed acid. Fast liquid-liquid reaction regime. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 1996. 35(2): p. 91-105
- [3] Satyanarayana, M. and Muraleedharan, C. A comparative study of vegetable oil methyl esters (biodiesels). *Energy*, 2011. 36(4): p. 2129-2137
- [4] Hemmati, A., Torab-Mostaedi, M., and Asdollahzadeh, M. Mass transfer coefficients in a Kühni extraction column. *Chemical engineering research and design*, 2015. 93: p. 747-754
- [5] Abolghasemi, H., Moosavian, M.A., and Radpour, S.R. The effects of a surfactant concentration on the mass transfer in a mixer-settler extractor. *Iranian journal of chemistry and chemical engineering (IJCCE)*, 2006. 25(4): p. 9-15.
- [6] Gourdon, C., Casamatta, G., and Angelino, H. Single drop experiments with liquid test systems: A way of comparing two types of mechanically agitated extraction columns. *The Chemical Engineering Journal*, 1991. 46(3): p. 137-148
- [7] Akhtar, M., Murray, B.S., and Dowu, S. A novel continuous process for making mayonnaise and salad cream using the spinning disc reactor: Effect of heat treatment. *Food Hydrocolloids*, 2014. 42: p. 223-228.

- [8] Pask, S., Nuyken, O., and Cai, Z. The spinning disk reactor: An example of a process intensification technology for polymers and particles. *Polym. Chem.*, 2012. 3: p. 2698-2707.
- [9] Marchetti, A., and Stoller, M. On the micromixing behavior of a spinning disk reactor for metallic Cu nanoparticles production. *Applied sciences*, 2019. 9: p. 3311
- [10] Appamana, W., Sukjarern, P., Ngaosuwan, K., and Assabumrungrat, S. Intensification of continuous biodiesel production using a spinning disc reactor. *Journal of chemical engineering of japan*, 2019. 52: p. 545-553.
- [11] Visscher, F., Nijhuis, R., Croon, M., and Schaaf, J. Liquid-liquid flow in an impeller-stator spinning disc reactor. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 2013. 71: p. 107-114
- [12] Joseph-Nathan, P., Liquid-liquid extraction. *Journal of chemical education*, 1967. 44(3): p. 176
- [13] Susanti, S., Winkelman, J., Schuur, B., and Heeres, H.J. Lactic acid extraction and mass transfer characteristics in slug flow capillary microreactors. *Industrial & engineering chemistry research*, 2016. 55(16): p. 4691-4702.
- [14] INCROPERA, F.P., *Fundamentals of heat and mass transfer*, ed. 6. 2005: John Wiley & Sons, Inc.
- [15] Leonard, B.P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1979. 19(1): p. 59-98.
- [16] Patankar, S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. 1980
- [17] Wang, Y., Li, J., Jin, Y., and Luo, J. Liquid-liquid extraction in a novel rotor-stator spinning disc extractor. *Separation and purification technology*, 2018. 207: p. 158-165.

- [18] Chen, K.-J., and Chen, Y.-S. Intensified production of biodiesel using a spinning disk reactor. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 2014. 78: p. 67-72
- [19] Qin, H., Zhang, C., Xu, Q., Li, W., Lei, K., and Zhang, J. Geometrical improvement of inline high shear mixers to intensify micromixing performance. *Chemical Engineering Journal*, 2017. 319: p. 307-320
- [20] Sattari-Najafabadi, M., and Nasr Esfahany, M.N. Intensification of liquid-liquid mass transfer in a circular microchannel in the presence of sodium dodecyl sulfate. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 2017. 117: p. 9-17.
- [21] Kobe steel, L. Benefits of a micro channel reactor. Available from: <https://www.kobelco.co.jp/english/products/ecmachinery/smcr/overview.html>.
- [22] Nuclear-power. Plug flow – slug flow. Available from: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/fluid-dynamics/two-phase-fluid-flow/plug-flow-slug-flow/>.
- [23] Pan, Y., Witt, P., Kuan, B., and Xie, D. Effect of flow and operating parameters on the spreading of a viscous liquid on a spinning disc. 2012.
- [24] Majnis, M.F., Azudin, N.Y., Abd Shukor, S.R., and Ahmad, A.L. A study on the mixing characteristics of thin liquid film flows over horizontal spinning disk surface. *Procedia engineering*, 2016. 148: p. 957-962.
- [25] Bhatelia, T. *Novel reactors for multiphase processes*. 2009.
- [26] Visscher, F., Schaaf, V., Croon, M.H.J.M., and Schouten, J.C. Liquid–liquid mass transfer in a rotor–stator spinning disc reactor. *Chemical engineering journal*, 2012. 185-186: p. 267-273.

- [27] Meeuwse, M., Hamming, E., Schaaf, J., and Schouten, J.C. Effect of rotor–stator distance and rotor radius on the rate of gas–liquid mass transfer in a rotor–stator spinning disc reactor. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 2011. 50(10): p. 1095-1107.
- [28] Haseidl, F., Pottbäcker, J., and Hinrichsen, O. Gas–liquid mass transfer in a rotor–stator spinning disc reactor: Experimental study and correlation. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 2016. 104: p. 181-189.
- [29] Burns, J.R., Ramshaw, C., and Jachuck, R.J. Measurement of liquid film thickness and the determination of spin-up radius on a rotating disc using an electrical resistance technique. *Chemical engineering science*, 2003. 58(11): p. 2245-2253.
- [30] Leroux, P., Sandpaper Roughness Measurement Using 3D Profilometry. 2014. 92
- [31] Makarytchev, S.V., Lagrish, T.A.G., and Prince, R.G.H. Structure and regimes of liquid film flow in spinning cone columns. *Chemical engineering science*, 1998. 53(8): p. 1541-1550.
- [32] Ong, C.L., and Owen, J.M. Computation of the flow and heat transfer due to a rotating disc. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1991. 12(2): p. 106- 115.
- [33] Dongxiang, W., Jin, X., Peng, H., Yu, J., and Cui, Z. Regulation of velocity zoning behaviour and hydraulic jump of impinging jet flow on a spinning disk reactor. *Chemical engineering journal*, 2020. 390: p. 124392.
- [34] Bhatelia, T., Utikar, R., Pareek, V., and Tadé, M. Characterizing liquid film thickness in spinning disc reactors. 2009
- [35] Mohammadi, S., and Boodhoo, K.V.K. Online conductivity measurement of residence time distribution of thin film flow in the spinning disc reactor. *Chemical engineering journal*, 2012. 207-208: p. 885-894.

- [36] Prieling, D. Computational investigation of liquid film flow on rotating disks, in Engineering sciences. 2013, Graze university of technology: Graze. p. 104 - 113.
- [37] Håkansson, A., and Innings, F. The dissipation rate of turbulent kinetic energy and its relation to pumping power in inline rotor-stator mixers. Chemical engineering and processing: process intensification, 2017. 115: p. 46-55.
- [38] Sana, S., Zivkovic, V., and Boodhoo, K. Shear-thinning effect of the spinning disc mixer on starch nanoparticle precipitation. Processes, 2020. 8(12): p. 1622.
- [39] Winkelmann, J. Diffusion coefficient of benzoic acid in water: Datasheet from physical chemistry volume 15B1: "Diffusion in Gases, Liquids and Electrolytes" in SpringerMaterials ([https://doi.org/10.1007/978-3-540-73735-3\\_573](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73735-3_573)). Springer-Verlag GmbH Germany.
- [40] Al-hengari, S. Process Intensification: A study of micromixing and residence time distribution characteristics in the spinning disc reactor in science agriculture and engineering 2011, Newcastle University Newcastle U. K. . p. 176. 93
- [41] Lozano, P. Vorticity and strain rate. 2008; Available from: <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/fluids/>.
- [42] Shi, J., Xu, S., Qin, H., Li, W., and Zhang, J. Gas-liquid Mass transfer characteristics in two inline high shear mixers. Industrial & engineering chemistry research, 2014. 53: p. 4894-4901.

ภาคผนวก

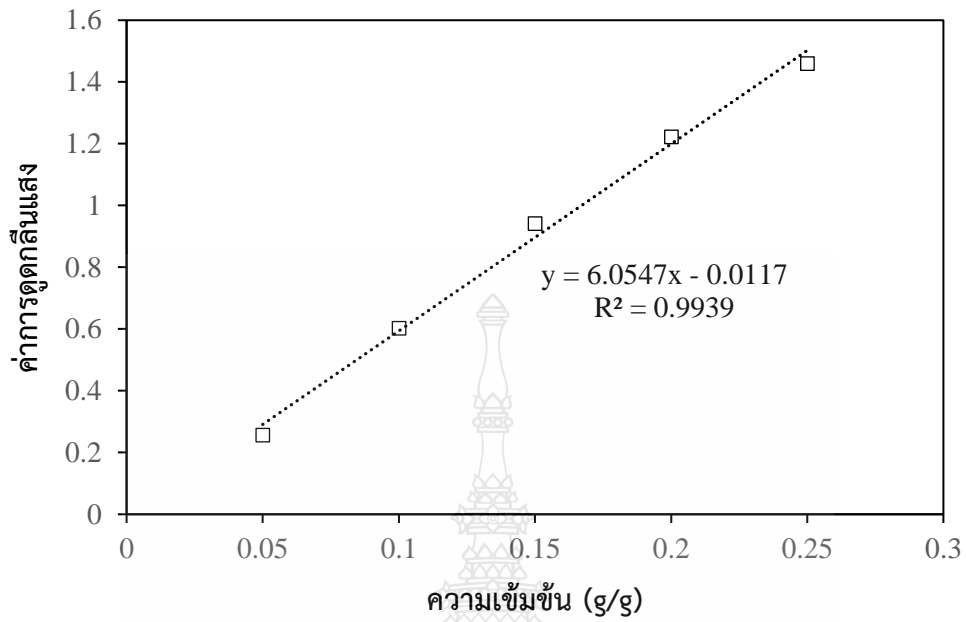


ภาคผนวก ก

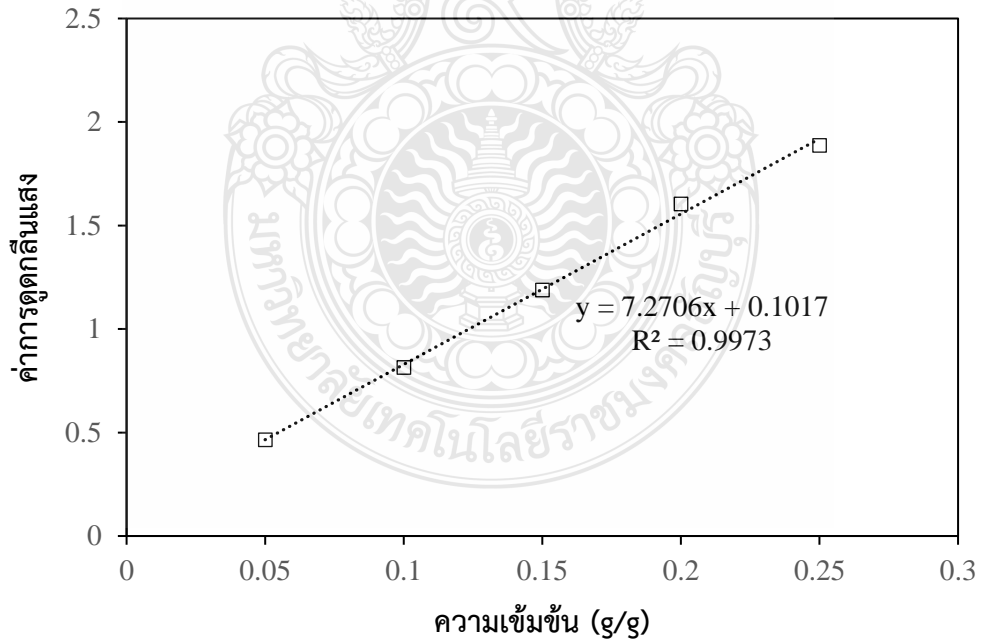
กราฟมาตรฐาน







รูปที่ ก1 กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดเบนโซอิกในน้ำ



รูปที่ ก2 กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปเทน

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการเตรียมสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปแทน



## ข ตัวอย่างการเตรียมสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปเทน

ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดเบนโซอิกในเฮปเทน ( $C_{in}$ ) สำหรับการทดลองการสกัด คือ 0.01 g/g  
ดังนั้นสามารถแสดงรายละเอียดการเตรียมสารละลายได้ดังนี้

1 คำนวณปริมาตรของสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปเทนที่ใช้สำหรับการทดลองการสกัด

ความเร็วการหมุนที่ใช้ในการทดลอง (R) ; 200 500 700 1000 1200 และ 1500 rpm

จำนวนการทดลอง (N) ; 6

อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง ( $Q_{tot}$ ) ; 5 ml/s

อัตราส่วนการป้อนน้ำต่อเฮปเทน ( $\theta$ ) ; 1

เวลาสำหรับดำเนินการสกัดต่อค่าความเร็วการหมุน ( $t_{operate}$ ) ; 5 min

เวลาสำหรับเก็บสารตัวอย่างหลังการสกัด ( $t_{sampling}$ ) ; 2 min

เวลาดำเนินการต่อความเร็วการหมุน ( $t_{tot}$ ) ;  $t_{operate} + t_{sampling} = 5 + 2 = 7$  min

จากสมการคำนวณอัตราการไหล

$$Q_H = \frac{V_H \times N}{t_{tot}} \quad (ข1)$$

$$V = Q_H \times t_{tot} \quad (ข2)$$

$$Q_{tot} = Q_W + Q_H$$

$$\theta = \frac{Q_W}{Q_H}$$

$$Q_W = \theta Q_H$$

$$Q_{tot} = Q_H + \theta Q_H$$

$$Q_{tot} = Q_H(\theta + 1)$$

$$Q_H = \frac{Q_{tot}}{(\theta + 1)} \quad (ข3)$$

แทนสมการที่ ข3 ในสมการที่ ข2

$$V = \frac{Q_{tot} \times N}{(\theta + 1)} \times t_{tot} \quad (\text{ข4})$$

แทนค่า  $Q_{tot}$   $\theta$  และ  $t_{tot}$  ลงในสมการที่ ข4

$$V = \frac{5 \frac{ml}{s} \times 6}{(1 + 1)} \times 7 \text{ min} \times \frac{60 s}{1 \text{ min}}$$

$$V = 6,300 \text{ ml}$$

แปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยมวล

$$m_H = 6,300 \text{ ml} \times \rho_H$$

$$m_H = 6,300 \text{ ml} \times 0.684 \frac{g}{ml}$$

$$m_H = 4,309.2 \text{ g}$$

2 คำนวณปริมาณกรดเบนโซอิกสำหรับการเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้น

ทำการเทียบอัตราส่วนสำหรับการเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้น 0.01 g/g ปริมาณ 4,309.2 g

สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ในสารละลาย 1 g ต้องใช้ปริมาณกรดเบนโซอิก 0.01 g

ถ้าในสารละลาย 4,309.2 g จะใช้ปริมาณกรดเบนโซอิก ; = 0.01 × 4,309.2 = 43.092 g

3 ชั่งกรดเบนโซอิกตามปริมาณที่คำนวณได้ในข้อที่ ข2 แล้วนำมาละลายด้วยเฮปแทนในปริมาตรตามที่คำนวณได้ในข้อที่ ข1 เพื่อเตรียมสารละลายกรดเบนโซอิกในเฮปแทนเพื่อใช้สำหรับดำเนินการทดลองต่อไป

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับการไตเตรท



ค ตัวอย่างการเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับการไตเตรท

สารละลายมาตรฐานที่เลือกใช้สำหรับการไตเตรท คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.01 mol/L ดังนั้นสามารถแสดงรายละเอียดการเตรียมสารละลายได้ดังนี้

ปริมาตรที่ทำการเตรียม ; 1000 ml

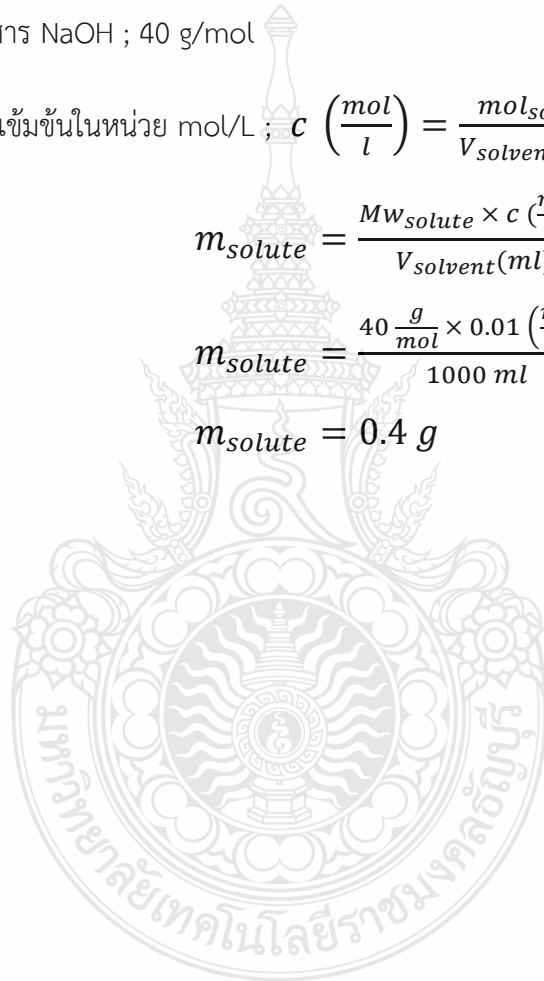
มวลโมเลกุลของสาร NaOH ; 40 g/mol

จากสูตรการคำนวณความเข้มข้นในหน่วย mol/L ;  $c \left( \frac{\text{mol}}{\text{l}} \right) = \frac{\text{mol}_{\text{solute}}}{V_{\text{solvent}}(\text{ml})} \times 1000$

$$m_{\text{solute}} = \frac{Mw_{\text{solute}} \times c \left( \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)}{V_{\text{solvent}}(\text{ml})} \times 1000$$

$$m_{\text{solute}} = \frac{40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 0.01 \left( \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)}{1000 \text{ ml}} \times 1000$$

$$m_{\text{solute}} = 0.4 \text{ g}$$



ภาคผนวก ง

ความเข้มข้นของสารละลายกรดเบนโซอิกหลังผ่านกระบวนการสกัด



ตารางที่ ง1 ความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกหลังจากกระบวนการสกัดที่ดำเนินการด้วยสภาวะต่าง ๆ โดยใช้  
 ผิวงานหมุนแบบเรียบ

Q (mL/s)	$\theta$	R (rpm)	ความเข้มข้น สมดุล (g/g)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (g/g)	ความเข้มข้น(g/g)		ร้อยละความ คลาดเคลื่อน
					น้ำ	เฮปแทน	
5	1	200	0.00180	0.010239	0.00160	0.00833	2.80
5	1	300	0.00202	0.010239	0.00173	0.00853	0.24
5	1	500	0.00288	0.010239	0.00210	0.00892	4.09
5	1	700	0.00362	0.010239	0.00240	0.00865	4.97
5	1	1000	0.00405	0.010239	0.00250	0.00850	6.64
5	1	1500	0.00390	0.010239	0.00246	0.00840	6.08
5	3	200	0.00075	0.010239	0.00484	0.00352	18.00
5	3	500	0.00103	0.010239	0.00587	0.00318	11.50
5	3	700	0.00110	0.010239	0.00612	0.00312	9.70
5	3	1000	0.00118	0.010239	0.00638	0.00308	7.57
5	3	1200	0.00121	0.010239	0.00647	0.00313	6.18
5	3	1500	0.00125	0.010239	0.00660	0.00322	4.00
5	5	200	0.00055	0.010239	0.00674	0.00276	7.24
5	5	500	0.00067	0.010239	0.00867	0.00239	8.12
5	5	700	0.00070	0.010239	0.00866	0.00237	7.70
5	5	1000	0.00088	0.010239	0.00952	0.00248	17.2
5	5	1200	0.00091	0.010239	0.00870	0.00192	3.75
5	5	1500	0.00097	0.010239	0.00898	0.00220	9.22



ตารางที่ ง1(ต่อ) ความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกหลังจากกระบวนการสกัดที่ดำเนินการด้วยสภาวะต่าง ๆ โดยใช้ผิวงานหมุนแบบเรียบ

Q (mL/s)	$\theta$	R (rpm)	ความเข้มข้น สมดุล (g/g)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (g/g)	ความเข้มข้น (g/g)		ร้อยละ ความ คลาดเคลื่อน
					น้ำ	เฮปเทน	
10	1	200	0.00156	0.010543	0.000158	0.000944	4.62
10	1	500	0.00250	0.010543	0.000182	0.000868	0.39
10	1	700	0.00260	0.010543	0.000210	0.000806	3.62
10	1	1000	0.00341	0.010543	0.000251	0.000768	3.39
10	1	1500	0.00365	0.010543	0.000231	0.000792	3.00
15	1	200	0.00161	0.010560	0.000158	0.000850	4.85
15	1	500	0.00222	0.010560	0.000189	0.000792	7.40
15	1	700	0.00188	0.010560	0.000172	0.000800	7.10
15	1	1000	0.00241	0.010560	0.000194	0.000779	6.98
15	1	1500	0.00246	0.010560	0.000203	0.000750	5.43

ตารางที่ ง2 ความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกหลังจากกระบวนการสกัดที่ดำเนินการด้วยสภาวะต่าง ๆ โดยใช้ผิวงานหมุนแบบผิวขรุขระ

Q (mL/s)	$\theta$	R (rpm)	ความเข้มข้น สมดุล (g/g)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (g/g)	ความเข้มข้น (g/g)		ร้อยละ ความ คลาดเคลื่อน
					น้ำ	เฮปเทน	
5	1	200	0.00276	0.010786	0.000156	0.000868	5.18
5	1	500	0.00342	0.010786	0.000197	0.000827	5.09
5	1	700	0.00416	0.010786	0.000222	0.000757	9.24
5	1	1000	0.00400	0.010786	0.000197	0.000753	7.92
5	1	1500	0.00357	0.010786	0.000205	0.000768	5.66

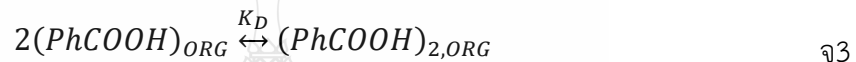
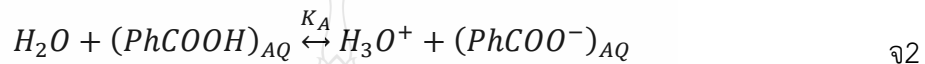
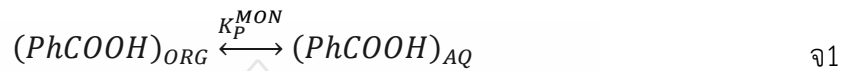
ภาคผนวก ง

การคำนวณความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในเฮปแทนที่สภาวะสมดุล



## จ การคำนวณความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในเฮปเทนที่สภาวะสมดุล

จากงานวิจัยของ junjie Gu และคณะ เมื่อพิจารณาในระบบสกัด น้ำ – กรดเบนโซอิก/เฮปเทน จะพบว่าสมดุลที่เกี่ยวข้องกับระบบการถ่ายโอนมวล 3 สมการด้วยกัน คือ



สมการที่ จ1 เป็นสมการสมดุลของการกระจายตัวของกรดเบนโซอิกระหว่างวัฏภาคเฮปเทน และน้ำ (partition equilibrium;  $K_p^{MON}$ ) สมการที่ จ2 เป็นสมดุลการแตกตัวของกรดเบนโซอิกในวัฏภาคน้ำ (acid dissociation equilibrium;  $K_A$ ) และสมการที่ จ3 เป็นสมดุลการรวมตัวเป็นสายโซ่ไดเมอร์ (dimerization equilibrium;  $K_D$ ) .ในวัฏภาคเฮปเทน โดยค่า  $K_p^{MON}$  และ  $K_D$  ถือเป็นแปรที่ถูกใช้ในการคำนวณค่าความเข้มข้นที่สมดุลสำหรับคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลต่อไป

สมการที่ จ4 เป็นสมการความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในวัฏภาคน้ำทั้งหมด ( $C_{AQ}^{HA}$ ) ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกที่แตกตัวในน้ำ ( $C_{AQ}^A$ ) และความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในวัฏภาคน้ำที่ไม่แตกตัว ( $C_{AQ}^{HA}$ ) และสมการที่ จ5 เป็นสมการความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในวัฏภาคเฮปเทนทั้งหมด ( $C_{ORG}^{TOT}$ ) ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกที่เป็นมอนอเมอร์ในวัฏภาคเฮปเทน ( $C_{ORG}^{MON}$ ) และความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกที่เป็นไดเมอร์ในวัฏภาคเฮปเทน ( $C_{ORG}^{DIM}$ )

$$C_{AQ}^{TOT} = C_{AQ}^{HA} + C_{AQ}^A \quad \text{จ4}$$

$$C_{ORG}^{TOT} = C_{ORG}^{MON} + 2C_{ORG}^{DIM} \quad \text{จ5}$$

ค่า  $C_{AQ}^{HA}$  ในสมการที่ จ4 สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 7 ซึ่งพิสูจน์มาจากสมการสมดุลการแตกตัว ( $K_A$ ) เมื่อค่า  $K_A$  มีค่าเท่ากับ  $6.16 \times 10^{-5}$

$$C_{AQ}^{HA} = \frac{-(0.5)K_A + (0.5)\sqrt{K_A^2 + (4C_{AQ}^{TOT} K_A)}}{K_A} \quad \text{จ6}$$

ค่า  $K_P^{OBS}$  เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกที่กระจายอยู่ในวัฏภาคเฮปแทน และวัฏภาคน้ำ ณ สภาวะที่สมดุล ดังแสดงในสมการที่ จ6

$$K_P^{OBS} = \frac{C_{ORG}^{TOT}}{C_{AQ}^{TOT}} = \frac{C_{ORG}^{MON} + 2C_{ORG}^{DIM}}{C_{AQ}^{HA} + C_{AQ}^{A-}} \quad \text{จ7}$$

$$K_P^{OBS} = \frac{K_P^{MON} + 2K_D(K_P^{MON})^2 C_{AQ}^{TOT}}{1 + \sqrt{\frac{K_A}{C_{AQ}^{TOT}}}} \quad \text{จ8}$$

โดยที่ค่าความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในวัฏภาคเฮปแทนสามารถคำนวณได้จาก

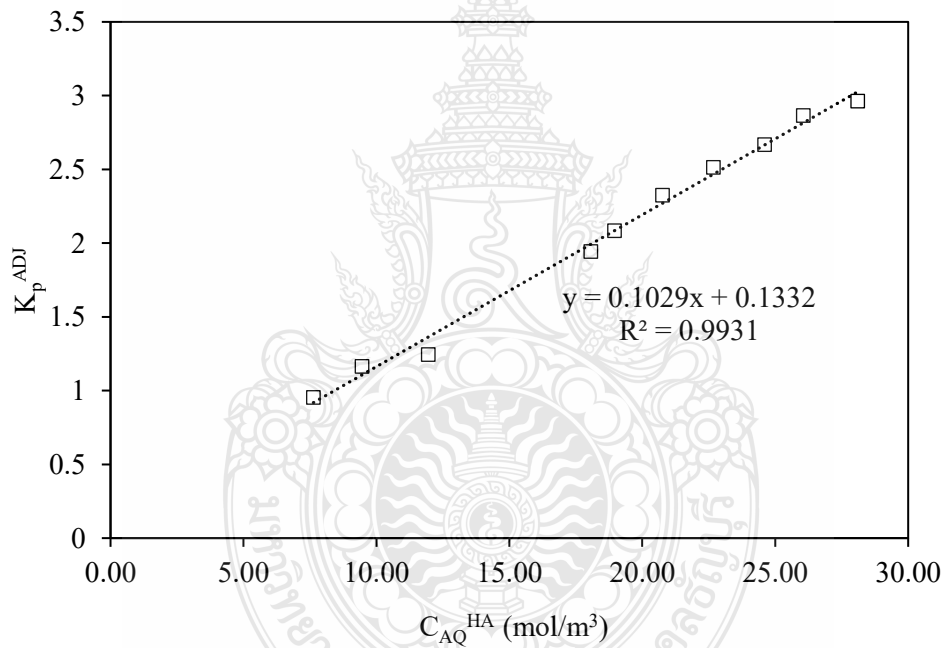
$$C_{ORG}^{*TOT} = K_P^{OBS} C_{AQ}^{TOT} \quad \text{จ9}$$

จากสมการที่ จ8 เพื่อที่จะหาค่า  $K_P^{OBS}$  จำเป็นต้องทราบค่า  $K_P^{MON}$  และ  $K_D$  ดังนั้นจึงกำหนดค่า  $K_P^{ADJ}$  (adjusted partition constant) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกที่กระจายอยู่ในวัฏภาคเฮปแทน ( $C_{ORG}^{TOT}$ ) ต่อความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกในวัฏภาคน้ำที่ไม่แตกตัว ( $C_{AQ}^{HA}$ ) สามารถแสดงได้ในสมการที่ จ10

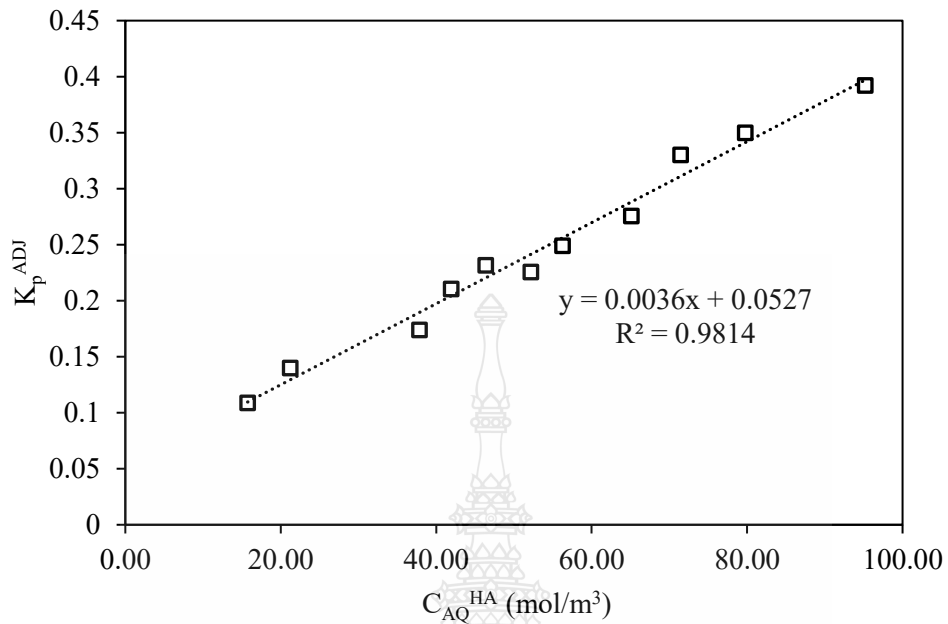
$$K_P^{ADJ} = \frac{C_{ORG}^{TOT}}{C_{AQ}^{HA}} = \frac{C_{ORG}^{MON} + 2C_{ORG}^{DIM}}{C_{AQ}^{HA}} \quad \text{จ10}$$

$$K_P^{ADJ} = K_P^{MON} + 2K_D(K_P^{MON})^2 C_{AQ}^{HA} \quad \text{จ11}$$

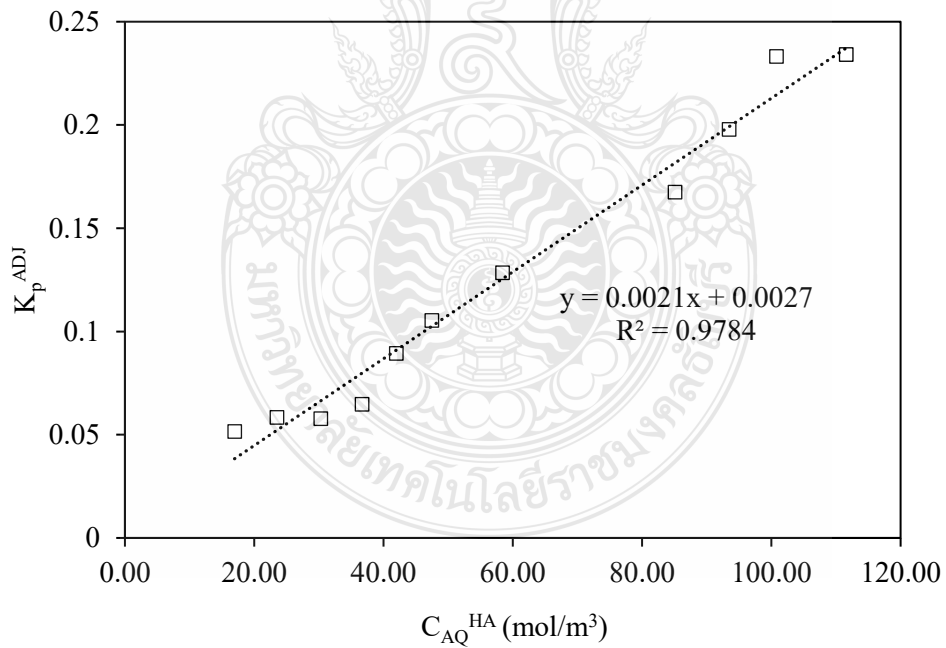
จากสมการที่ จ11 จะเห็นได้ว่าเป็นสมการเส้นตรงซึ่งเมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $K_P^{ADJ}$  กับ  $C_{AQ}^{HA}$  จะได้จุดตัดแกน y เป็น  $K_P^{MON}$  และ ความชันของกราฟเป็น  $2K_D(K_P^{MON})^2$  สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_P^{ADJ}$  กับ  $C_{AQ}^{HA}$  ในระบบที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำต่อเฮปแทนที่ 1:1 3:1 และ 5:1 ได้ดังนี้



รูปที่ จ1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_P^{ADJ}$  กับค่า  $C_{AQ}^{HA}$  ในระบบที่ค่า  $\theta$  เท่ากับ 1:1



รูปที่ จ2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_p^{ADJ}$  กับค่า  $C_{AQ}^{HA}$  ในระบบที่ค่า  $\theta$  เท่ากับ 3:1



รูปที่ จ3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_p^{ADJ}$  กับค่า  $C_{AQ}^{HA}$  ในระบบที่ค่า  $\theta$  เท่ากับ 5:1

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณประสิทธิภาพการสกัด และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล



## ฉ1 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการสกัด

ความเร็วการหมุนที่ใช้ในการทดลอง (R) ; 1000 rpm

อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง ( $Q_{tot}$ ) ; 5 ml/s

อัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างน้ำต่อเฮปเทน ( $\theta$ ) ; 1

ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดเบนโซอิกในเฮปเทน ( $C_{o,i}$ ) ; 0.010239 g/g

ความเข้มข้นหลังการสกัดของกรดเบนโซอิกในเฮปเทน ( $C_{o,e}$ ) ; 0.00768 g/g

ความเข้มข้นหลังการสกัดของกรดเบนโซอิกในเฮปเทนที่สภาวะสมดุล ( $C_{o,e}^*$ ) ; 0.00405 g/g

จากสมการที่ 2.1 สมการคำนวณประสิทธิภาพการสกัด

$$E = \frac{C_{o,e} - C_{o,i}}{C_{o,e}^* - C_{o,i}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$E = \frac{0.00768 - 0.010239}{0.00405 - 0.010239} \times 100\%$$

$$E = 41.34\%$$

## ฉ2 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

ความเร็วการหมุนที่ใช้ในการทดลอง (R) ; 1000 rpm = 104.72 rad/s

อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง ( $Q_{tot}$ ) ;  $5 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s

อัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างน้ำต่อเฮปเทน ( $\theta$ ) ; 1

ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดเบนโซอิกในเฮปเทน ( $C_{o,i}$ ) ; 0.010239 g/g

ความเข้มข้นหลังการสกัดของกรดเบนโซอิกในเฮปเทน ( $C_{o,e}$ ) ; 0.00768 g/g

ความเข้มข้นหลังการสกัดของกรดเบนโซอิกในเฮปเทนที่สมดุล ( $C_{o,e}^*$ ) ; 0.00405 g/g

รัศมีของจานหมุน ( $R_1$ ) ; 0.065 m

ความหนืดจลน์ของสารผสม ( $\nu$ ) ;  $8.523 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s



จากสมการที่ 4.6 สมการประมาณค่าความสูงของชั้นฟิล์มของเหลวจากโมเดลของนซ์เชิลท์

$$h_N = \left( \frac{3Qv}{2\pi r^2 \omega^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.6)$$

$$H = h_N = \left( \frac{3 \times 5 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \times 8.523 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}}{\pi \times (0.065)^2 m^2 \times (1000)^2 \frac{rad^2}{min^2} \times \frac{1}{60^2} \frac{min^2}{s^2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$H = 0.00012 m$$

จากสมการที่ 2.1 สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

$$k_L a = \frac{Q}{H\pi R_1^2} \ln \frac{C_{o,e}^* - C_{o,i}}{C_{o,e}^* - C_{o,e}} \quad (2.9)$$

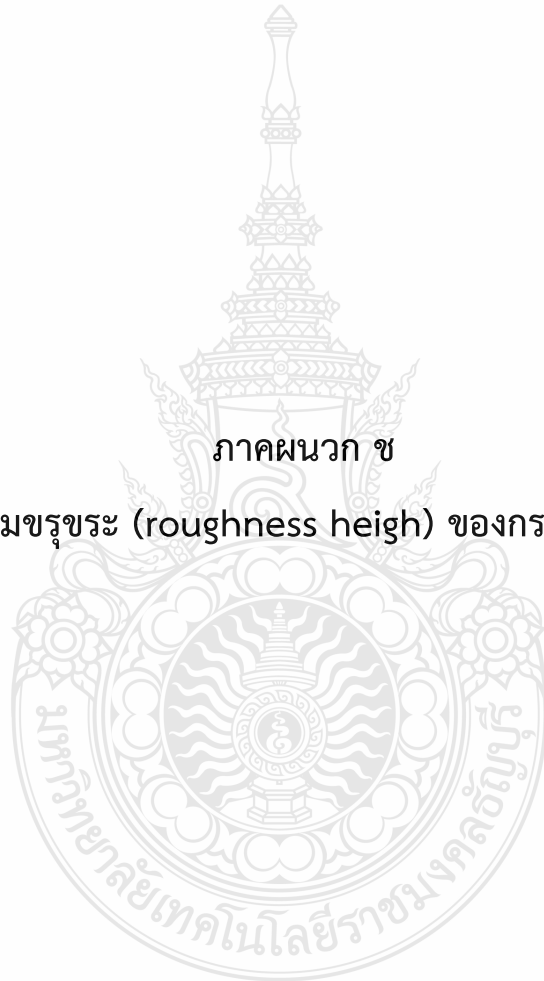
แทนค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องลงในสมการที่ 2.1

$$k_L a = \frac{5 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}}{0.00012 m \times 3.14 \times 0.065^2 m^2} \ln \left( \frac{0.00405 - 0.010239}{0.00405 - 0.00768} \right)$$

$$k_L a = 1.676 s^{-1}$$

ภาคผนวก ข

ค่าความขรุขระ (roughness height) ของกระดาษทราย



ตารางที่ ข1 ค่าความขรุขระของกระดาษทรายขนาดต่าง ๆ

ระดับความละเอียด	เบอร์กระดาษทราย	ความขรุขระ (micron)
1. Extra Coarse	16-grit	1324
	24-grit	764
	36-grit	538
2. Coarse	40-grit	425
	50-grit	336
3. Medium	60-grit	269
	80-grit	201
4. Fine	100-grit	162
	120-grit	125



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายจตุพล เย็นน้ำ
วัน เดือน ปีเกิด	15 เมษายน 2540
ที่อยู่	99/76 หมู่บ้านศุภาลย์วิลล์ – แพรกษา ตำบลแพรกษา อำเภอมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10280
การศึกษา	ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	09-5958-1378
อีเมลล์	jatupon_y@mail.rmutt.ac.th

